

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA**  
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales

---



**Contribución al estudio de los índices europeos de  
valoración del ruido ambiental en ambiente urbano**

**TESIS DOCTORAL**

Presentada por:  
Alberto Giménez Sancho

Dirigida por:  
Esteban Gaja Díaz  
Antonio Reig Fabado

Valencia, Junio 2010

# CONTRIBUCIÓN AL ESTUDIO DE LOS ÍNDICES EUROPEOS DE VALORACIÓN DEL RUIDO AMBIENTAL EN AMBIENTE URBANO

ALBERTO GIMÉNEZ SANCHO

---

## RESUMEN

La presente Tesis Doctoral pretende establecer las características fundamentales de los niveles sonoros  $L_{DEN}$ ,  $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$  y  $L_{NIGHT}$  dentro del ámbito urbano. En este sentido se pretende, tras un análisis de las características que presentan estos niveles, establecer un estudio que permita determinar las incertidumbres cometidas cuando se realizan estimaciones de larga duración en base a medidas de menor duración.

Como parte de esta investigación, y teniendo en cuenta el objetivo perseguido, se recabó información de estudios y publicaciones que versaran sobre la temática a desarrollar. En estos estudios encontrados se observa que en la mayoría de ellos los períodos de tiempo empleados son de corta duración (menor a una semana), existiendo un menor número de publicaciones con datos de media duración (uno o dos meses) y una práctica ausencia de estudios de niveles sonoros de larga duración. Asimismo, en la práctica totalidad de estos estudios sólo es estudiado el nivel sonoro  $LA_{eq}$ , sin llegar a evaluar los niveles sonoros que establece la normativa europea 2002/49/CE, por lo que se considera que debe establecerse un punto de partida para la estimación y determinación de estos niveles sonoros.

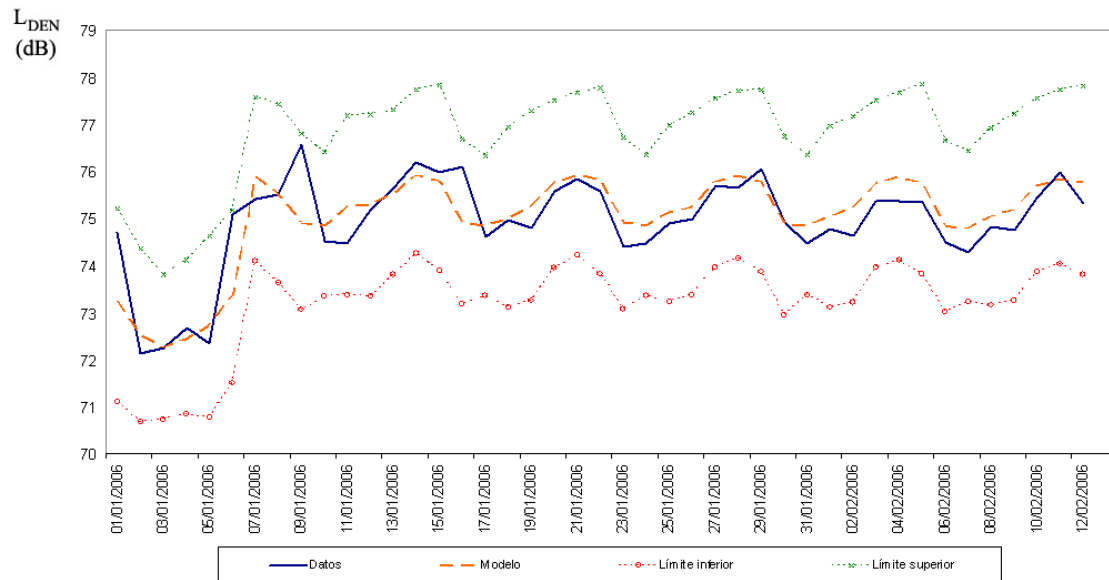
El desarrollo de la investigación parte del conocimiento de los niveles sonoros de una hora de duración durante cinco años en continuo correspondientes a cinco localizaciones distintas de la ciudad de Madrid. El hecho de realizar el estudio en distintas localizaciones tiene como objetivo el poder comparar los resultados entre las localizaciones de forma que se puedan establecer semejanzas o similitudes en función de la zona (residencial, comercial, tráfico,...). Una vez analizadas las características de los niveles sonoros de cada una de las localizaciones se establecen, a priori, tres metodologías a seguir para la estimación de los niveles sonoros.

La primera de estas metodologías se basa en la estimación de los niveles en base al muestreo. Para ello se establecen distintas estrategias de medición (por medidas realizadas en continuo o medidas realizadas de forma aleatorias y variando el número de días) contemplando distintos períodos de predicción (nivel sonoro diario, semanal, quincenal, mensual y anual) de forma que se obtienen los errores e imprecisiones obtenidas por cada una de estas estrategias correspondientes a distintos períodos de predicción.

La segunda metodología desarrollada se basa en la teoría de que los niveles sonoros de una hora de duración,  $LA_{eq,1h}$ , a una hora determinada del día son similares a los niveles sonoros de una hora de duración,  $LA_{eq,1h}$ , a la misma hora pero de cualquier otro día, de forma que estos niveles sonoros se acumulan en torno a un valor medio y podrían ser explicados mediante una variable estadística. El hecho de poderse explicar este comportamiento mediante una variable estadística nos permitiría conocer la probabilidad de que una medida de una hora de duración este dentro de un determinado margen de error respecto de la estimación de un nivel sonoro de mayor duración y su representatividad respecto del nivel sonoro de la franja horaria donde es realizada la medida. Por ello, en el desarrollo de la investigación, se realizaron distintos tests de hipótesis con el objetivo de detectar que variable estadística es la más apropiada para determinar el ajuste de los niveles sonoros de una hora de duración. Como en la anterior metodología dichos tests fueron aplicados para cada una de las series de una hora correspondientes a las 24 horas del día y en todas las localizaciones. Se observó que las distribuciones estadísticas Log-Logistic3P y la distribución Johnson SU son las más apropiadas para describir dichos niveles sonoros, si bien se debe destacar que existen diferencias en los parámetros de dichas distribuciones al comparar entre localizaciones.

Por último, la tercera metodología se basa en la búsqueda de un modelo matemático que explicara el comportamiento de los niveles sonoros y permitiera a partir del mismo realizar predicciones a futuro de los niveles sonoros. Tras realizar diversos análisis se observa que los niveles sonoros pueden explicarse a partir de un modelo Gaussian Ornstein – Uhlenbeck con reversión a la media. Este modelo contempla una parte determinista, explicada mediante una constante,  $A$ , y una tendencia lineal (en la práctica despreciable) en adición de una función senoidal que describe las diferencias estacionales a lo largo del año. Por otra parte el modelo contempla una componente

aleatoria que presenta propiedades de volatilidad y reversión a la media siendo dependientes del día de la semana en consideración. De esta forma, se establecen para cada una de las localizaciones los parámetros que definen el modelo en cada localización así como la comparación de los resultados entre localizaciones y especialmente para los parámetros de volatilidad y reversión a la media.



Simulación obtenida del modelo matemático y los intervalos de confianza obtenidos para el nivel sonoro  $L_{DEN}$  correspondiente a los primeros meses del año 2006.

Todo el trabajo realizado y las conclusiones obtenidas en cada una de las metodologías realizadas marcan una referencia en cuanto al estudio de los niveles sonoros  $L_{DEN}$ ,  $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$  y  $L_{NIGHT}$  de larga duración y abren las puertas a nuevas líneas de investigación enmarcadas en la presente tesis doctoral. En este sentido se puede remarcar la búsqueda del modelo matemático para los valores mínimos diarios de cada uno de los niveles sonoros con el objetivo de poder definirlos de mejor forma al presentar una variabilidad menor. Por otro lado el estudio de eventos sonoros anómalos es un punto de investigación poco desarrollado y su tratamiento estadístico podría permitir implementar técnicas de control y detección de los mismos, para una mayor optimización en las mediciones. Por último, y para concluir, también se abre una puerta para la preparación de algoritmos que permitan obtener el tiempo de estabilización en tiempo real



# CONTRIBUTION TO THE STUDY OF EUROPEAN NOISE LEVELS IN URBAN CONDITIONS

ALBERTO GIMÉNEZ SANCHO

---

## ABSTRACT

This thesis aims to provide the essential features of the noise levels  $L_{DEN}$ ,  $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$  and  $L_{NIGHT}$  in urban areas. In this sense it is intended, after analyzing the characteristics presented by these noise levels, to establish a study to determine the uncertainties committed when making long-term estimates based on measures of shorter duration.

As part of this investigation, and taking into account the objective, information was gathered from studies and publications that dealt with the topic to develop. In these studies, it can be seen that most of them the time periods evaluated are of short duration (less than a week), fewer publications with data on medium duration (one or two months) and a virtual absence of studies of long-term noise levels. Also, almost all of these studies only examined the  $LA_{eq}$  noise level, without actually evaluating noise levels established by European Legislation Directive 2002/49/EC. So it is considered that there should be a starting point for estimating and identification of these noise levels.

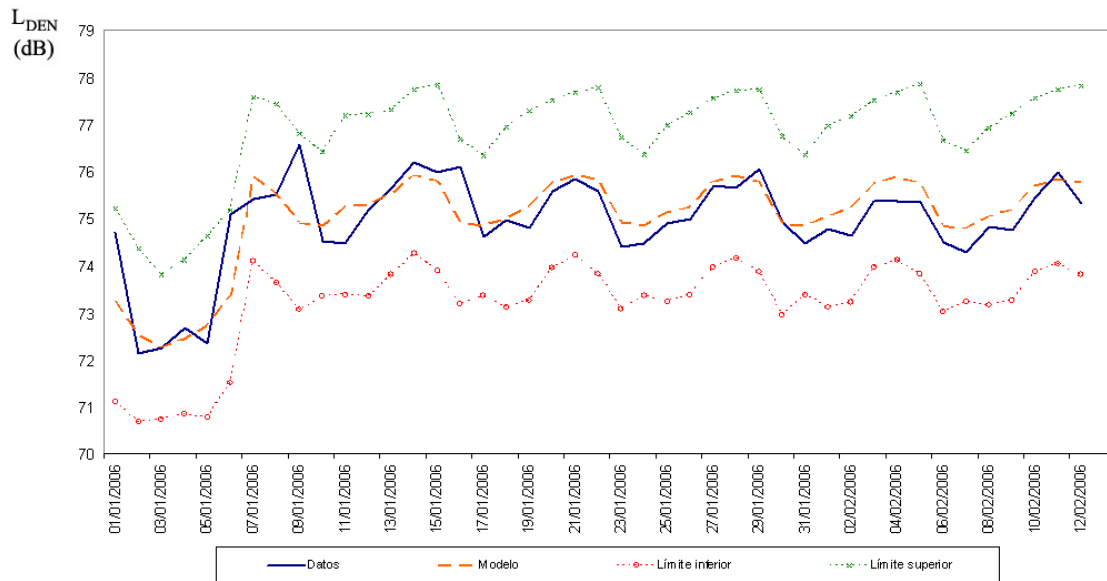
The research takes in account the sound levels of one hour duration measured continuously during five years in five different locations in the city of Madrid. The study in different locations aims to compare results between locations, so that, it can be established similarities in terms of a different area (residential, commercial, traffic ,...). After analyzing the characteristics of the noise levels of each of the locations are established, a priori, to follow three methodologies for estimating sound levels.

The first of these methodologies is based on the estimated levels based on sampling strategies. This set different measurement strategies (for continuous measurements or

measurements made at random and varying the number of days) looking at different periods of prediction (daily, weekly, biweekly, monthly and annual noise levels). It is obtained the errors and inaccuracies obtained by each of these strategies at various periods of prediction.

The second methodology developed is based on the theory that the noise level of one hour duration,  $LA_{eq,1h,,}$  at a certain time of day is similar to noise level of one hour,  $LA_{eq,1h,,}$  at the same time but any other day. So that these noise levels accumulate around a mean value and could be explained by a statistical variable. Different hypothesis tests were performed in order to detect which variable is most appropriate to determine the adjustment of noise levels of one hour duration. As in the previous methodology such tests were applied to each series of one hour for 24 hours a day and at all locations. It was noted that the statistical distributions Log-Logistic3P and Johnson SU distribution are most appropriate to describe these noise levels, although it should be noted that there are differences in the parameters of these distributions when comparing between locations.

Finally, the third methodology is based on finding a mathematical model to explain the behaviour of noise levels and also to make predictions of future noise levels. Daily noise levels can be explained from a Gaussian Ornstein - Uhlenbeck model with mean reversion properties. This model includes a deterministic part, explained by a constant,  $A$ , and a linear trend (practically negligible) in addition to a sine function that describes the seasonal differences throughout the year. Furthermore, the model includes a random component that has properties of volatility and mean reversion still dependent on weekday considered. In this way, are set, for each of the locations, the parameters defining the model and also the comparison of the results between sites (especially for the parameters of volatility and mean reversion).



Simulation and confidence intervals for noise level  $L_{DEN}$ .

All work performed and the conclusions reached in each of the methodologies could be taken as a reference about the estimation of long term noise levels  $L_{DEN}$ ,  $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$  and  $L_{NIGHT}$  and open the door to new research framed in this thesis. In this sense one can highlight the study of a mathematical model for the daily minimum noise level in order to define the best way to present a lower variability in noise level estimations. On the other hand the study of abnormal noise events and its statistical treatment, development and to implement control techniques may allow detection and control them for further optimization of the measurements. Finally, to conclude, also this research, opens a door for the development of algorithms that could achieve the necessary estimation time in real time.

# CONTRIBUCIÓ A L'ESTUDI DELS ÍNDEXS EUROPEUS DE VALORACIÓ DEL SOROLL AMBIENTAL EN AMBIENT URBÀ

ALBERTO GIMÉNEZ SANCHO

---

## RESUM

La present Tesi Doctoral pretén establir les característiques fonamentals dels nivells sonors  $L_{DEN}$ ,  $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$  i  $L_{NIGHT}$  dins de l'àmbit urbà. En aquest sentit es pretén, després d'una anàlisi de les característiques que presenten estos nivells, establir un estudi que pugui permetre determinar les incerteses comeses quan es realitzen.

Com a part d'esta investigació, i tenint en compte l'objectiu perseguit, es va buscar informació d'estudis i publicacions que versaren sobre la temàtica a desenvolupar. En estos estudis trobats s'observa que en la majoria d'ells els períodes de temps empleats són de curta duració (inferiors a una setmana), existint un menor nombre de publicacions amb dades de mitja duració (un o dos mesos) i una pràctica absència d'estudis de nivells sonors de llarga duració. Així mateix, en la pràctica totalitat d'estos estudis només és estudiat el nivell sonor  $L_{Aeq}$ , sense arribar a avaluar els nivells sonors que estableix la normativa europea 2002/49/CE, per la qual cosa es considera que ha d'establir-se un punt de partida per a l'estimació i determinació d'estos nivells sonors."

El desenvolupament de la investigació part del coneixement dels nivells sonors d'una hora de duració durant cinc anys en continu corresponents a cinc localitzacions diferents de la ciutat de Madrid. El fet de realitzar l'estudi en distintes localitzacions té com a objectiu el poder comparar els resultats entre les localitzacions de manera que es puguin establir semblances o similituds en funció de la zona (residencial, comercial, trànsit,...). Una vegada analitzades les característiques dels nivells sonors de cada una de les localitzacions s'estableixen, a priori, tres metodologies que s'han de seguir per a l'estimació dels nivells sonors.

La primera d'estes metodologies es basa en l'estimació dels nivells basant-se en el mostratge. Per a això s'establixen distintes estratègies de mesurament (per mesures

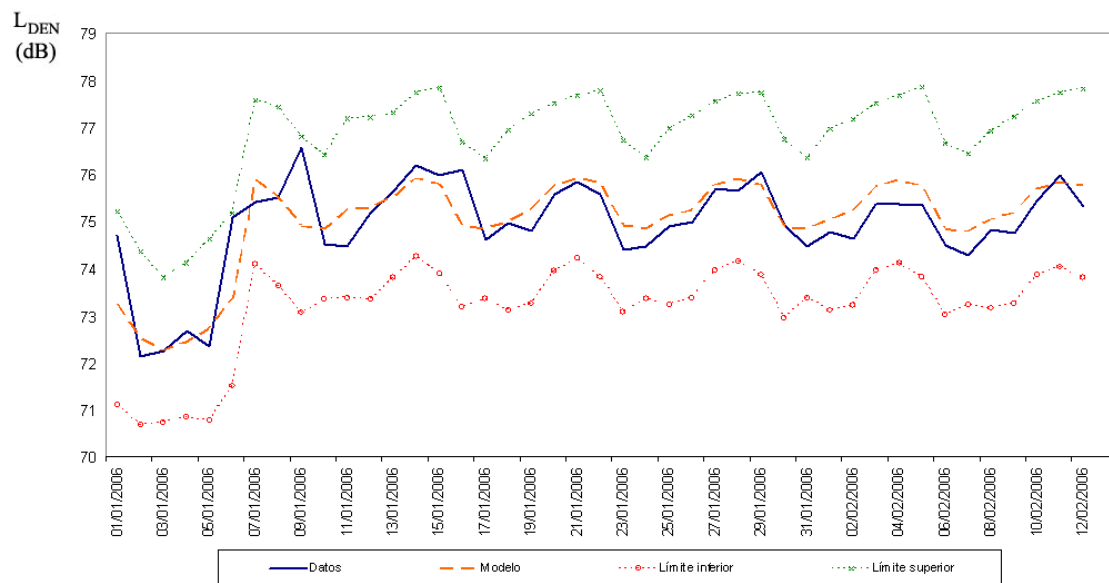
realitzades en continu o mesures realitzades de forma aleatòries i variant el nombre de dies) contemplant distints períodes de predicció (nivell sonor diari, setmanal, quinzenal, mensual i anual) de manera que s'obtenen els errors i imprecisions obtingudes per cada una d'estes estratègies corresponents a distints períodes de predicció.

La segona metodologia desenrotllada es basa en la teoria que els nivells sonors d'una hora de duració,  $L_{Aeq,1h}$ , a una hora determinada del dia són semblants als nivells sonors d'una hora de duració,  $L_{Aeq,1h}$ , a la mateixa hora però de qualsevol altre dia, de manera que estos nivells sonors s'acumulen entorn d'un valor mitjà i podrien ser explicats per mitjà d'una variable estadística. El fet de poder-se explicar este comportament per mitjà d'una variable estadística ens permetria conèixer la probabilitat que una mesura d'una hora de duració estiga dins d'un determinat marge d'error respecte de l'estimació d'un nivell sonor de major duració i la seua representativitat respecte del nivell sonor de la franja horària on és realitzada la mesura.

Per això, en el desenvolupament de la investigació, es van realitzar distints tests d'hipòtesis estadístics amb l'objectiu de detectar quina variable estadística és la més apropiada per a determinar l'ajustament dels nivells sonors d'una hora de duració. Com en l'anterior metodologia els mencionats tests van ser aplicats per a cada una de les sèries d'una hora corresponents a les 24 hores del dia i en totes les localitzacions. Es va observar que les distribucions estadístiques Log-Logistic3P i la distribució Johnson SU són les més apropiades per a descriure els nivells sonors, no obstant s'ha de destacar que hi ha diferències en els paràmetres de les distribucions al comparar entre les distintes localitzacions.

Finalment, la tercera metodologia es basa en la busca d'un model matemàtic que puga explicar el comportament dels nivells sonors i puga permetre a partir del mateix model realitzar prediccions a futur dels nivells sonors. Després de realitzar diverses anàlisis s'observa que els nivells sonors poden explicar-se a partir d'un model Gaussian Ornstein - Uhlenbeck amb reversió a la mitjana. Aquest model contempla una part determinista, explicada per mitjà d'una constant,  $A$ , i una tendència lineal (en la pràctica menyspreable) en addició d'una funció sinusoïdal que descriu les diferències estacionals al llarg de l'any. D'altra banda el model contempla una component aleatòria que presenta propietats de volatilitat i reversió a la mitjana sent dependents del dia de la

setmana en consideració. D'esta manera, s'estableixen per a cada una de les localitzacions els paràmetres que defineixen el model en cada localització així com la comparació dels resultats entre localitzacions i especialment per als paràmetres de volatilitat i reversió a la mitjana.



Simulació obtinguda del model matemàtic i els intervals de confiança obtinguts per al nivell sonor LDEN corresponent als primers mesos de l'any 2006.

Tot el treball realitzat i les conclusions obtingudes en cada una de les metodologies realitzades marquen una referència quant a l'estudi dels nivells sonors  $L_{DEN}$ ,  $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$  i  $L_{NIGHT}$  de llarga duració i obrin les portes a noves línies d'investigació emmarcades en la present tesi doctoral. En este sentit es pot remarcar la busca del model matemàtic per als valors mínims diaris de cada un dels nivells sonors amb l'objectiu de poder definir-los de millor forma al presentar una variabilitat menor. Per un altre costat l'estudi d'esdeveniments sonors anòmals és un punt d'investigació poc desenrotllat i el seu tractament estadístic podria permetre implementar tècniques de control i detecció dels mateixos, per a una major optimització en les mesures. Finalment, i per a concloure, també s'obri una porta per a la preparació d'algoritmes que permeten obtindre el temps d'estabilització en temps real.

# ÍNDICE GENERAL

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. Introducción .....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>2. Conceptos básicos .....</b>  | <b>5</b>  |
| 2.1 Presión sonora y nivel de presión sonora .....   | 5         |
| 2.2. Medida subjetiva del sonido .....   | 14        |
| 2.3 Nivel sonoro continuo equivalente .....  | 19        |
| 2.4 Nivel sonoro equivalente day-evening-night. ....   | 22        |
| <b>3. Descripción entorno de medida .....</b>  | <b>23</b> |
| <b>4. Comparación de niveles sonoros .....</b>   | <b>33</b> |
| 4.1. Introducción .....  | 33        |
| 4.2 Análisis previo de los niveles $L_{DEN}$ , $L_{DAY}$ , $L_{EVENING}$ y $L_{NIGHT}$ . ....  | 35        |
| 4.3 Diferencias entre el nivel $L_{DEN}$ y los niveles $L_{DAY}$ , $L_{EVENING}$ y $L_{NIGHT}$ . ....  | 41        |
| 4.4 Influencia de los fines de semana y festivos en medidas de larga duración. ....  | 47        |
| <b>5. Técnicas de estimación y predicción de los niveles sonoros <math>L_{DEN}</math>, <math>L_{DAY}</math>, <math>L_{EVENING}</math> y <math>L_{NIGHT}</math> .....</b> | <b>55</b> |
| 5.1 Metodología basada en el muestreo .....  | 55        |
| 5.1.1 Introducción .....   | 55        |
| 5.1.2 Estimación de los niveles anuales (larga duración) .....   | 57        |
| 5.1.3 Número de días de medición de niveles sonoros para la estimación de períodos de 7, 14 y 28 días .....  | 68        |
| 5.1.4 Número de horas de medición para la estimación de los niveles sonoros diarios. ....  | 79        |

|  |            |
|--|------------|
| 5.2 Ajuste estadístico de los niveles sonoros.....   | 95         |
| 5.2.1 <i>Introducción</i> .....  | 95         |
| 5.2.2 <i>Análisis y resultados</i> .....   | 101        |
| 5.3 Modelo matemático de serie temporal.....   | 123        |
| 5.3.1 <i>Introducción</i> .....  | 123        |
| 5.3.2 <i>Modelo para los niveles sonoros.</i> .....  | 125        |
| 5.3.2.1. <i>Modelo determinista</i> .....  | 125        |
| 5.3.2.2. <i>Volatilidad</i> .....  | 127        |
| 5.3.2.3. <i>Reversión a la media</i> .....   | 128        |
| 5.3.2.4. <i>Estimación de parámetros</i> .....   | 130        |
| 5.3.2.5. <i>Procedimiento de cálculo</i> .....   | 134        |
| 5.3.3 <i>Resultados del modelo en la localización A.</i> .....                               | 136        |
| 5.3.4 <i>Comparación y resultados del modelo en todas las</i><br><i>localizaciones</i> ..... | 143        |
| <b>6. Líneas de investigación .....</b>  | <b>149</b> |
| <b>7. Conclusiones.....</b>  | <b>151</b> |
| <b>8. Bibliografía .....</b>   | <b>161</b> |



## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.1. Evolución de la presión sonora en función del tiempo. ....   | 5  |
| Figura 2.2. Sonido con presión sonora de distinta frecuencia. ....   | 6  |
| Figura 2.3. Longitud de onda del sonido. ....  | 6  |
| Figura 2.4. Sonido periódico simple. ....  | 7  |
| Figura 2.5. Sonido periódico complejo. ....  | 8  |
| Figura 2.6. Sonido aleatorio. ....   | 8  |
| Figura 2.7. Sonido transitorio. ....   | 8  |
| Figura 2.8. Descomposición de un sonido en bandas de octava y tercios de octava. ....  | 9  |
| Figura 2.9. Isolíneas de igual sonoridad de Fletcher-Munson. ....  | 15 |
| Figura 2.10. Sonoridad en relación al nivel de presión sonora y la frecuencia. ....  | 15 |
| Figura 2.11. Ponderación frecuencial A,B, C. ....  | 16 |
| Figura 2.12. Gráfica de niveles equivalentes de 1 segundo, 1 minuto y cinco minutos. ....  | 19 |
| Figura 2.13. Gráfica de niveles equivalentes de 1 hora y 24 horas. ....  | 20 |
| Figura 3.1. Evolución del nivel sonoro $L_{DEN}$ en cada una de las localizaciones. ....   | 24 |
| Figura 3.2. Evolución del nivel sonoro $L_{DAY}$ en cada una de las localizaciones. ....   | 25 |
| Figura 3.3. Evolución del nivel sonoro $L_{EVENING}$ en cada una de las localizaciones. ....   | 25 |
| Figura 3.4. Evolución del nivel sonoro $L_{NIGHT}$ en cada una de las localizaciones. ....   | 25 |
| Figura 4.1. Niveles mensuales $L_{DEN}$ en distintos años en la localización D. ....   | 36 |
| Figura 4.2. Desviación típica mensual (niveles $L_{DEN}$ , $L_{DAY}$ , $L_{EVENING}$ y $L_{NIGHT}$ ) en la localización D. ....  | 38 |
| Figura 4.3. Nivel sonoro y desviación típica mensual del nivel $L_{DEN}$ en localización C. ....   | 39 |
| Figura 4.4. Nivel sonoro y desviación típica mensual del nivel $L_{DEN}$ en localización D. ....   | 39 |
| Figura 4.5. Evolución temporal diaria de la diferencia entre el nivel $L_{DEN}$ y los niveles $L_{DAY}$ , $L_{EVENING}$ y $L_{NIGHT}$ en la localización B. ....                     | 42 |
| Figura 4.6. Evolución de las diferencias mensuales entre el nivel $L_{DEN}$ y los niveles $L_{DAY}$ , $L_{EVENING}$ y $L_{NIGHT}$ para la localización A. ....                       | 44 |
| Figura 4.7. Evolución diaria de las diferencias $L_{DAY} - L_{EVENING}$ y $L_{DAY} - L_{NIGHT}$ en la localización A. ....   | 45 |
| Figura 4.8. Evolución diaria de la diferencia $L_{DAY} - L_{EVENING}$ en la localización E. ....   | 45 |
| Figura 5.1.1. Banda prob. $\pm 1$ dB para la estrategia de días continuos y nivel $L_{DEN}$ . ....   | 61 |
| Figura 5.1.2. Banda prob. $\pm 1$ dB para la estrategia de días aleatorios y nivel $L_{DEN}$ . ....  | 62 |
| Figura 5.1.3. Probabilidad banda $\pm 1$ dB de cada uno de los niveles sonoros para la estrategia de días continuos todos los días y sólo días laborables en la localización B. .... | 64 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 5.1.4. Probabilidad banda $\pm 1$ dB de cada uno de los niveles sonoros para la estrategia de días aleatorios todos los días y sólo días laborables en la localización B .....    | 64  |
| Figura 5.1.5. Correlación entre el error medido y la desviación típica de la muestra para la estrategia de 5 días aleatorios.....  | 65  |
| Figura 5.1.6. Tiempo de estabilización del nivel $L_{DEN}$ de 28 días de una muestra .....   | 68  |
| Figura 5.1.7. Media y rango de variación entre el nivel de cada hora y el correspondiente a cada periodo (DAY, EVENING y NIGHT) para el año 2002 en la localización D.....               | 81  |
| Figura 5.1.8. Histogramas del error en la estimación del nivel diario $L_{DEN}$ en base a la medición de una hora dentro de cada franja horaria para cada una de las localizaciones..... | 89  |
| Figura 5.2.1. Valor del nivel sonoro $L_{Aeq,1h}$ el 18 junio de 2001 en la localización A .....   | 95  |
| Figura 5.2.2. Evolución diaria de los niveles sonoros $L_{eq,1h}$ correspondientes a distintos días en la localización A (año 2001).....   | 96  |
| Figura 5.2.3. Distribución estadística para las variables normalizadas $L_{eq,1h,i} - L_{DAY,i}$ , del año 2002 en la localización A .....   | 103 |
| Figura 5.2.4. Distribución estadística para las variables normalizadas $L_{eq,1h,i} - L_{EVENING,i}$ del año 2002 en la localización A .....   | 104 |
| Figura 5.2.5. Distribución estadística para las variables normalizadas $L_{eq,1h,i} - L_{NIGHT,i}$ del año 2002 en la localización A .....   | 104 |
| Figura 5.2.6. Ajuste de diferentes distribuciones estadísticas .....   | 108 |
| Figura 5.2.7. Ajuste a la distribución empírica Johnson SU para una hora específica dentro de cada período horario en la localización A y en distintos años.....                         | 120 |
| Figura 5.2.8. Ajuste a la distribución empírica Johnson SU para una hora específica dentro de cada período horario en la localización E y en distintos años .....                        | 121 |
| Figura 5.2.9. Ajuste a distribuciones estadísticas Johnson SU de distintas horas dentro de la franja DAY en el año 2004 para la localización A.....                                      | 122 |
| Figura 5.3.1. Gráfica de autocorrelación para el nivel $L_{DAY}$ en la localización A .....  | 127 |
| Figura 5.3.2. Esquema de procedimiento de cálculo del modelo.....  | 135 |
| Figura 5.3.3. Modelo determinista sobre datos reales en el año 2004 para el nivel $L_{DEN}$ . ....   | 138 |
| Figura 5.3.4. Función de autocorrelación parcial de los residuos del nivel $L_{DEN}$ .....   | 141 |
| Figura 5.3.5. Valor medio e intervalos de confianza de la simulación del modelo correspondientes al nivel $L_{DEN}$ . ....   | 142 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 2.1. Frecuencias en bandas de octava y tercios de octava.....   | 10 |
| Tabla 2.2. Valores típicos de niveles sonoros .....   | 12 |
| Tabla 2.3. Ponderación frecuencial A, B y C.....  | 17 |
| Tabla 4.1. Promedio anual (dB) correspondiente al nivel $L_{DEN}$ en distintas localizaciones....   | 35 |
| Tabla 4.2. Rango de las medias mensuales (dB) correspondientes al nivel $L_{DEN}$ . ....  | 36 |
| Tabla 4.3. Intervalo medio de la diferencia entre el nivel anual y el nivel mensual<br>contemplando todos los años (en dB). ....  | 37 |
| Tabla 4.4 Rango de la desviación típica mensual contemplando todos los años. (en dB) .....  | 40 |
| Tabla 4.5 Estadísticos (en dB) de la diferencia diaria entre el nivel $L_{DEN}$ y los niveles $L_{DAY}$ ,<br>$L_{EVENING}$ y $L_{NIGHT}$ para todas las localizaciones y contemplando todos los años .....  | 41 |
| Tabla 4.6. Rango de variación mensual (en dB) de las diferencias $L_{DAY} - L_{EVENING}$ y $L_{DAY} -$<br>$L_{NIGHT}$ para cada una de las estaciones contemplando todos los años.....  | 46 |
| Tabla 4.7. Valor promedio anual $L_{DEN}$ (en dB) correspondiente a días laborables.....  | 47 |
| Tabla 4.8. Valor promedio anual de los días laborables y de todos los días para los niveles<br>$L_{DAY}$ , $L_{EVENING}$ y $L_{NIGHT}$ (en dB) en cada localización .....   | 48 |
| Tabla 4.9. Margen de la diferencia en el promedio mensual (en dB), a lo largo del año,<br>entre el nivel de todos los días y el nivel correspondiente a los días laborables .....   | 49 |
| Tabla 4.10. Diferencia en el valor medio y rango de variación (en dB) para la desviación<br>típica correspondiente a tomar los días laborables respecto de tomar todos los días. (para<br>el 95% datos).....  | 50 |
| Tabla 4.11. Desviaciones típicas mensuales de los niveles $L_{DEN}$ , $L_{DAY}$ , $L_{EVENING}$ y $L_{NIGHT}$<br>para la localización D correspondientes al año 2002 .....  | 51 |
| Tabla 4.12. Medias anuales (en dB) para cada una de las series $L_{DEN} - L_{DAY} / L_{DEN} - L_{EVENING}$<br>$/ L_{DEN} - L_{NIGHT}$ .....   | 52 |
| Tabla 4.13. Valor medio para las desviaciones típicas mensuales (dB) correspondientes a<br>las series $L_{DEN} - L_{DAY} / L_{DEN} - L_{EVENING} / L_{DEN} - L_{NIGHT}$ . ....  | 53 |
| Tabla 5.1.1. Estadísticos del error cometido en la estimación del nivel anual $L_{DEN}$ (en dB)<br>al tomar estrategias de medición de días continuos y aleatorios correspondientes en la<br>localización A.....  | 58 |
| Tabla 5.1.2. Estadísticos del error cometido en la estimación de niveles sonoros anuales<br>(en dB) al tomar estrategias de medición de días continuos y aleatorios correspondientes a<br>los niveles $L_{DAY}$ , $L_{EVENING}$ ( $L_E$ ) y $L_{NIGHT}$ ( $L_N$ ) en la localización A..... | 59 |

|  |    |
|--|----|
| Tabla 5.1.3. Probabilidad de la banda $[-1; +1]$ dB para cada nivel sonoro y localización correspondiente a la estrategia de días continuos. ( $L_E = L_{\text{EVENING}}$ ; $L_N = L_{\text{NIGHT}}$ ) .....   | 60 |
| Tabla 5.1.4. Probabilidad de la banda $[-1; +1]$ dB para cada nivel sonoro y localización correspondiente a la estrategia de días aleatorios. ( $L_E = L_{\text{EVENING}}$ ; $L_N = L_{\text{NIGHT}}$ ) .....  | 60 |
| Tabla 5.1.5. Porcentaje de muestras dentro de la banda $\pm 1$ dB y fuera de la banda del 90% de probabilidad para las muestras con desviación típica superior a 2 dB en la localización A.....  | 66 |
| Tabla 5.1.6. Tiempo de estabilización (en días) para cada nivel sonoro y localización para distintos períodos de estimación .....  | 70 |
| Tabla 5.1.7. Porcentaje de muestras con un determinado número de días como tiempo de estabilización, $t_{\pm 1\text{dB}}$ , para el nivel $L_{\text{DEN}}$ .....   | 72 |
| Tabla 5.1.8. Porcentaje de muestras con un determinado número de días como tiempo de estabilización, $t_{\pm 1\text{dB}}$ , para el nivel $L_{\text{DAY}}$ . ....  | 73 |
| Tabla 5.1.9. Porcentaje de muestras con un determinado número de días como tiempo de estabilización, $t_{\pm 1\text{dB}}$ , para el nivel $L_{\text{EVENING}}$ .....   | 74 |
| Tabla 5.1.10. Porcentaje de muestras con un determinado número de días como tiempo de estabilización, $t_{\pm 1\text{dB}}$ , para el nivel $L_{\text{NIGHT}}$ . ....   | 75 |
| Tabla 5.1.11. Porcentaje de muestras con un margen de error $\pm 1$ dB al tomar un determinado número de días como tiempo de estabilización, $t_{\pm 1\text{dB}}$ , correspondiente a la estimación de períodos de 28 días laborables. ....  | 77 |
| Tabla 5.1.12. Tiempo de estabilización (en días) para los niveles $L_{\text{DEN}}$ , $L_{\text{DAY}}$ , $L_{\text{EVENING}}$ y $L_{\text{NIGHT}}$ correspondientes a la estimación de 7, 14 y 28 días laborables contemplando todas las localizaciones (para el 95% datos).....                                    | 78 |
| Tabla 5.1.13. Media ( $\mu$ ) y desviación típica ( $\sigma_{n-1}$ ) para la serie normalizada $L_{\text{eq.1h}} - L_{\text{periodo}}$ de cada hora del año 2004. (dB).....  | 80 |
| Tabla 5.1.14. Media anual ( $\mu$ ) y desviación típica ( $\sigma_{n-1}$ ) para la serie de datos $L_{\text{eq.1h}} - L_{\text{periodo}}$ de cada hora y distintos años para la localización B. (dB).....  | 82 |
| Tabla 5.1.15. Margen de variación entre cada una de las horas de la franja horaria para el valor medio y la desviación típica de las series, $L_{\text{eq1hour}} - L_{\text{DAY}}$ , $L_{\text{eq1hour}} - L_{\text{EVENING}}$ y $L_{\text{eq1hour}} - L_{\text{NIGHT}}$ , en todas las localizaciones. (dB) ..... | 83 |
| Tabla 5.1.16. Estadísticas del error en base a una hora de medición en cada una de las localizaciones considerando todos los años. (dB).....   | 84 |
| Tabla 5.1.17. Porcentaje de muestras con un margen de error $\pm 1$ dB y $\pm 2$ dB para la estimación de los niveles sonoros diarios $L_{\text{DAY}}$ , $L_{\text{EVENING}}$ y $L_{\text{NIGHT}}$ a partir de mediciones en continuo de un determinado número de horas.....                                       | 85 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 5.1.18. Porcentaje de muestras con un margen de error $\pm 1$ dB y $\pm 2$ dB para la estimación de los niveles sonoros diarios $L_{DAY}$ , $L_{EVENING}$ y $L_{NIGHT}$ a partir de mediciones de un determinado número de horas aleatorias ..... | 86  |
| Tabla 5.1.19. Estadísticos del error en la estimación del nivel diario $L_{DEN}$ en base a la medición de una hora dentro de cada franja horaria. (dB) .....  | 88  |
| Tabla 5.1.20. Estadística del error cometido en la estimación de períodos de 7, 14 y 28 días a partir de medidas de una hora de duración en la localización A. (dB) .....   | 91  |
| Tabla 5.1.21. Estadísticos del error correspondientes a la estimación de la media del nivel sonoro correspondiente a 28 días laborables a partir de medidas de una hora de duración (dB) .....  | 92  |
| Tabla 5.2.1. Media, $\mu$ , y desviación típica, $\sigma_{n-1}$ , para cada una de las horas de las series:<br><br>$L_{eq,1h} - L_{NIGHT}$ , $L_{eq,1h} - L_{DAY}$ , $L_{eq,1h} - L_{EVENING}$ contemplando todos los años.....                         | 102 |
| Tabla 5.2.2. Media anual ( $\mu$ ), y desviación típica ( $\sigma$ ) en diferentes años para cada una de las series normalizadas $L_{eq,1h,i} - L_{DAY,i}$ , $L_{eq,1h,i} - L_{EVENING,i}$ y $L_{eq,1h,i} - L_{NIGHT,i}$ en la localización D.....      | 105 |
| Tabla 5.2.3. Porcentaje de horas que superan los test de hipótesis en cada localización contemplando todas las horas y todos los años .....   | 107 |
| Tabla 5.2.4. Porcentaje de horas que superan los tests de hipótesis en cada localización y para cada franja horaria contemplando todos los años.....  | 109 |
| Tabla 5.2.5. Porcentaje de años que ajustan a las distribuciones Log-Logistic3P y Johnson SU para cada una de las horas del día .....   | 111 |
| Tabla 5.2.6. Porcentaje de años que ajustan a alguna distribución estadística para cada una de las horas del día y localización .....   | 112 |
| Tabla 5.2.7. Parámetros del ajuste a la distribución Johnson SU para cada una de las horas de la localización A correspondientes al año 2005 .....  | 113 |
| Tabla 5.2.8. Parámetros del ajuste a la distribución Johnson SU para cada una de las horas de la localización B correspondientes al año 2005.....   | 114 |
| Tabla 5.2.9. Parámetros del ajuste a la distribución Johnson SU para cada una de las horas de la localización D correspondientes al año 2005 .....  | 115 |
| Tabla 5.2.10. Parámetros del ajuste a la distribución Johnson SU para cada una de las horas de la localización E correspondientes al año 2005.....  | 116 |
| Tabla 5.2.11. Parámetros del ajuste a la distribución estadística Johnson SU en distintos años para la localización A en la franja horaria DAY.....   | 118 |
| Tabla 5.2.12. Parámetros ajuste a la distribución estadística Johnson SU en distintos años para la localización A en la franja horaria NIGHT .....  | 119 |
| Tabla 5.2.13. Parámetros ajuste a la distribución estadística Johnson SU en distintos años  |     |

|   |     |
|---|-----|
| para la localización A en la franja horaria EVENING .....   | 119 |
| Tabla 5.3.1. Modelo determinista para los niveles sonoros en la localización A.....   | 136 |
| Tabla 5.3.2. Diferencia en el parámetro A, del modelo determinista, para cada día de la semana respecto del nivel del lunes en la localización A..... | 137 |
| Tabla 5.3.3. Volatilidad (en dB) y velocidad de reversión (en días <sup>-1</sup> ) para el nivel L <sub>DEN</sub> . ....                              | 139 |
| Tabla 5.3.4. Volatilidad (en dB) y velocidad de reversión (en días <sup>-1</sup> ) para nivel L <sub>DAY</sub> .....                                  | 139 |
| Tabla 5.3.5. Volatilidad (en dB) y velocidad de reversión (en días <sup>-1</sup> ) para nivel L <sub>EVENING</sub> . ....                             | 140 |
| Tabla 5.3.6. Volatilidad (en dB) y velocidad de reversión (en días <sup>-1</sup> ) para nivel L <sub>NIGHT</sub> .....                                | 140 |
| Tabla 5.3.7. Resultados test de los residuos del nivel L <sub>EVENING</sub> (corchetes p-valor). ....   | 141 |
| Tabla 5.3.8. Modelo determinista para los niveles sonoros en la localización B.....   | 144 |
| Tabla 5.3.9. Modelo determinista para los niveles sonoros en la localización C.....   | 144 |
| Tabla 5.3.10. Modelo determinista para los niveles sonoros en la localización D.....  | 144 |
| Tabla 5.3.11. Volatilidades medias (en dB) para cada localización.....  | 146 |
| Tabla 5.3.12. Valor medio de la velocidad de reversión (en días <sup>-1</sup> ) en cada localización.....   | 147 |

## SIMBOLOGÍA

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| $a_\mu$ ó $a$ ,             | Parámetro de reversión a la media.  |
| $c$ ,                       | Velocidad de propagación del sonido.  |
| $f$ ó $f$ ,                 | Frecuencia.   |
| $L_p$ ,                     | Nivel de presión sonora   |
| $L_{Aeq}$ ó $L_{Aeq,T}$ ,   | Nivel sonoro continuo equivalente para el período T.  |
| $L_{DEN}$ ,                 | Nivel sonoro equivalente día-tarde-noche, según D. 2002/49/EC.  |
| $L_{EVENING}$ ,             | Nivel sonoro equivalente período tarde, según D. 2002/49/EC.  |
| $L_{DAY}$ ,                 | Nivel sonoro equivalente período día, según D. 2002/49/EC.  |
| $L_{NIGHT}$ ,               | Nivel sonoro equivalente período noche, según D. 2002/49/EC.  |
| $L_{periodo}$ ,             | Nivel sonoro equivalente (donde período puede ser DAY, EVENING ó NIGHT en función del período de referencia.                          |
| $L_{i,t}^e$ ,               | Modelo determinista para la media de los niveles sonoros en un determinado día t. El índice i hace referencia a DAY, EVENING ó NIGHT. |
| $P$ ,                       | Presión sonora.   |
| $P_o$ ,                     | Presión atmosférica.  |
| $P_{ef}$ ,                  | Presión sonora eficaz.  |
| $t_{\pm 1dB}$ ,             | Tiempo de estabilización para la banda error $\pm 1$ dB.  |
| $t_{\pm 2dB}$ ,             | Tiempo de estabilización para la banda error $\pm 2$ dB.  |
| $\beta_i \cdot S_{i,j,t}$ , | Variable dummy.   |
| $W_t$ ,                     | Proceso de Wiener.  |
| $\sigma_\mu$ ó $\sigma_t$ , | Parámetro de la volatilidad.  |
| $\lambda$ ,                 | Longitud de onda del sonido.  |
| $\sigma$ ó $\sigma_{n-1}$ , | Desviación típica muestral.   |
| $\mu$ ,                     | Media muestral.   |

## 1. INTRODUCCIÓN

El problema del ruido en las ciudades es cada día más importante, afectando a las personas expuestas a niveles sonoros elevados en la calidad de vida, en su rendimiento en el trabajo y en la salud. Fruto de esta preocupación, las autoridades europeas centraron inicialmente sus esfuerzos en el control de los niveles sonoros de las posibles fuentes originarias de ruido, estableciendo una primera normativa.

Ahora bien, este control, propuesto en principio por la comisión europea, no contempla que diariamente el ruido ambiental consta de múltiples focos de emisión sonora que contribuyen a generar niveles de contaminación inadmisibles y se ve necesario una nueva orientación de control de los niveles sonoros ambientales. Fruto de esta preocupación surge una nueva directiva europea (2002/49/CE) que establece una serie de medidas y actuaciones que deben llevar a cabo las autoridades de los estados miembros para el control del nivel sonoro ambiental.

Dentro de estas medidas y actuaciones, la Comisión Europea establece el parámetro  $L_{DEN}$  de larga duración, que se basa en medidas en continuo correspondientes a un año de duración para la evaluación de las molestias ocasionadas a las personas. De la misma forma, entre otras cosas, obliga a los estados miembros a la realización de mapas de ruido, donde se contemplen los niveles sonoros  $L_{DEN}$  para poblaciones superiores a los 250.000 habitantes, indicando por zonas a que niveles sonoros está expuesta la población, debiendo de establecer, a partir de los mismos, una serie de medidas o actuaciones que minimicen los valores de los niveles sonoros a los que está expuesta la población.



Atendiendo a este parámetro de evaluación, las autoridades locales deben de realizar un plan local para la determinación de los niveles  $L_{DEN}$ , contemplando la norma dos posibilidades, la realización de predicciones en base a simulaciones (basadas en modelos de propagación de ruido, fuentes sonoras, etc.) realizadas por ordenador, o bien realizar mediciones. Si se basa la determinación de los niveles  $L_{DEN}$  a partir de las mediciones a lo largo de todo un año implicaría un gran esfuerzo, tanto en tiempo de medición como en coste económico debido a los medios (tanto humanos como en equipamiento) que se necesita emplear para llevar a cabo el plan. Por otro lado la realización de simulaciones plantea el problema de tener que contrastar los resultados a través de alguna medición, y para ello hace falta determinar cual debe ser el tiempo de medición representativo para verificar los resultados de la simulación de forma que se proporcione un margen de error para la simulación. En la práctica, los técnicos a la hora de evaluar los niveles sonoros y en función del tipo de fuente predominante en la zona suelen tomar como tiempo representativo una duración en la medición en torno a una hora de duración, o en peores casos, tomar una duración menor, por ejemplo de 15 a 30 minutos y extrapolar en estimación a la medición de una hora de duración. De esta manera se pretende intentar reducir los tiempos de medición, evitando tener que tomar medidas de larga duración estimando a partir de estos niveles sin llegar a establecer un margen de error determinado.

La preocupación que se plantea es indicar si realmente ese intervalo de corta duración es realmente representativo de la medición de larga duración ya que existe muy escasa, bibliografía en referencia a este tema (y menos aún en lo referente a los niveles  $L_{DEN}$ ,  $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$  o  $L_{NIGHT}$ ). Es más, los interrogantes que surgen son: ¿Cuánto tiempo se

debería medir?, ¿Cuál es el margen de error? ¿Cómo son de representativas las medidas de niveles sonoros diarios?.

Por tanto y persiguiendo el objetivo de estimar los niveles sonoros urbanos con un margen de error determinado y evaluar si los procedimientos actuales son coherentes en base a las estimaciones/afirmaciones que se infieren, en la presente Tesis Doctoral se establecen una serie de estrategias y procedimientos de evaluación:

1 – Se pretende estimar el parámetro  $L_{DEN}$  de larga duración a partir de medidas de corta duración, buscando, no solamente la evaluación de dicho parámetro, sino que separadamente, plantear las mismas estrategias para los niveles sonoros de larga duración  $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$  y  $L_{NIGHT}$ . De forma que se pueda observar si existe diferencia significativa en la estimación de cada uno de estos niveles sonoros por separado. Se pretenden obtener unos resultados que, en función del período de evaluación y el correspondiente al de muestreo contemple la variabilidad de los datos de medición, contrastando las hipótesis planteadas hasta el momento, y estableciendo los errores de imprecisión en función de la metodología empleada.

2- Por otra parte, y para estimaciones de niveles sonoros diarios, se pretenderá evaluar la representatividad de las estimaciones de estos niveles ( $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$  y  $L_{NIGHT}$ ) a partir de estimaciones en base a una hora de medición ( $L_{eq,1hora}$ ) dentro de la franja horaria correspondiente, incidiendo en el análisis estadístico de la distribución acumulada de los niveles sonoros de una hora (para una hora específica) a lo largo del año. De forma que si dicha distribución sigue una distribución empírica conocida se podría obtener la probabilidad del error en la estimación de los niveles sonoros  $L_{DAY}$ ,

$L_{\text{EVENING}}$  o  $L_{\text{NIGHT}}$  a partir de una hora de medición. Asimismo, también nos permitiría obtener si para determinadas horas (a lo largo del día) las estimaciones son mejores con respecto a otras horas, de forma que se obtengan los niveles de dispersión que los niveles sonoros tienen a una hora determinada.

3- Establecer un modelo matemático coherente que explique el comportamiento de los niveles sonoros diarios a lo largo del año con independencia del entorno evaluado que en nuestro caso se limitará a definir si el modelo es aplicable a cualquier tipo de calle. De esta forma se podría analizar las fluctuaciones de los niveles sonoros a lo largo del año y establecer las correspondientes correcciones en función del período donde se realicen las estimaciones.

Es por ello y debido a los diferentes objetivos planteados para la presente Tesis Doctoral y con el ánimo de no extendernos en esta introducción, la estructura de la presente Tesis Doctoral esta planteada en base a cada uno de estos objetivos en diferentes apartados, de forma que, para cada uno de los mismos se establece una pequeña introducción donde se indican las referencias y estudios previos realizados hasta la actualidad que nos han llevado a reconsiderar los distintos tipos de análisis. De esta forma consideramos que el lector podrá seguir mejor el hilo de las explicaciones y comprender mejor cada una de las hipótesis planteadas considerando la situación actual.

## 2. CONCEPTOS BÁSICOS

### 2.1 PRESIÓN SONORA Y NIVEL DE PRESIÓN SONORA

El sonido aéreo es una vibración en un medio elástico, donde las partículas del aire, sometidas a vibración, oscilan alrededor de su posición de equilibrio, produciendo fluctuaciones de la presión atmosférica, las cuales son capaces de producir una sensación auditiva. El elemento generador del sonido se denomina fuente sonora y la generación del sonido tiene lugar cuando la fuente sonora vibra y transmite esa vibración a las partículas del aire adyacentes, de la misma forma que se transmiten a las partículas adyacentes, y así sucesivamente. Dicha vibración es conocida como onda de presión sonora. En la figura 2.1 se observa, para un punto determinado, la evolución de la presión sonora en función del tiempo. Dicha presión es la suma de la presión atmosférica,  $P_0$ , y la presión asociada a la onda sonora,  $P$ . El valor máximo de la oscilación respecto a la presión atmosférica recibe el nombre de amplitud.

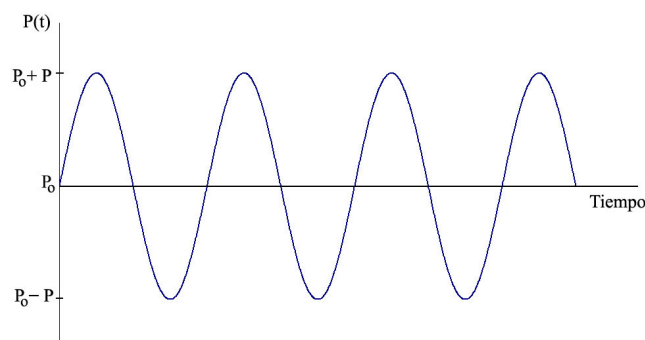


Figura 2.1. Evolución de la presión sonora en función del tiempo.

El número de oscilaciones por segundo de la presión sonora se denomina frecuencia ( $f$ ) del sonido y se mide en hertzios (Hz) o ciclos por segundo (c/s). Dicha frecuencia coincide con la frecuencia de vibración mecánica de la fuente que lo ha generado. En la figura 2.2 se observan dos ejemplos de presión sonora de distinta frecuencia.

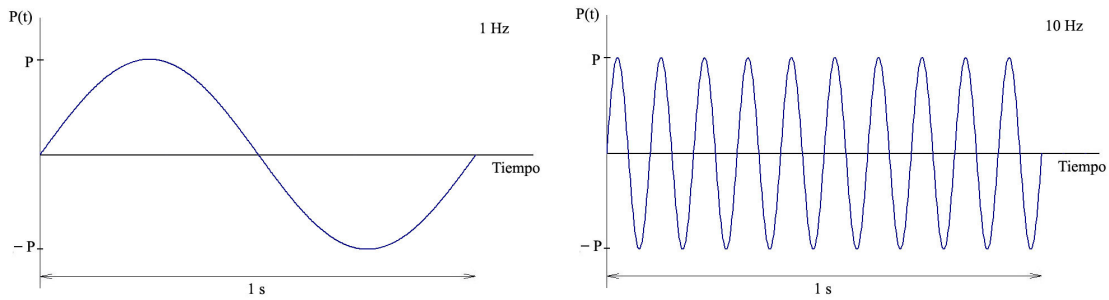


Figura 2.2. Sonido con presión sonora de distinta frecuencia.

La forma en que la perturbación – la onda de presión – se traslada de un lugar a otro se denomina propagación sonora, siendo la velocidad de propagación,  $c$ , función de la elasticidad y densidad del medio de propagación. Para el aire seco, a  $0^\circ \text{C}$  y 1 atmósfera de presión atmosférica la velocidad de propagación del sonido es de 331,45 m/s. La longitud de onda del sonido,  $\lambda$ , se define como la distancia entre dos puntos consecutivos del campo sonoro que se hallan en el mismo estado de vibración en cualquier instante de tiempo, como puede verse, a modo de ejemplo en la figura 2.3.

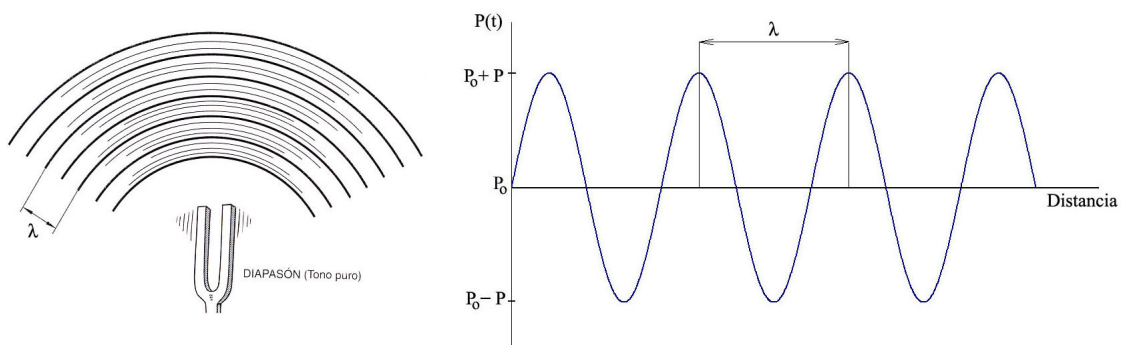


Figura 2.3. Longitud de onda del sonido.

La relación entre la frecuencia, la longitud de onda y la velocidad de propagación, viene dada por la expresión:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

De esta forma al aumentar la frecuencia, la longitud de onda disminuye.

Al variar la presión con el tiempo es común expresarla en función de su valor eficaz, que se utiliza como valor representativo de su promedio temporal. Haciendo referencia a la presión eficaz,  $P_{ef}$ , se determina de acuerdo con la expresión:

$$P_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T p^2(t) \cdot dt}$$

Estando el sonido generalmente compuesto de un gran número de diferentes frecuencias, el análisis espectral permite estudiar como es esta composición de frecuencias, para ello se descompone el sonido en los diversos sonidos puros o armónicos que lo forman. Por ejemplo, en función de la descomposición en frecuencia podemos encontrarnos los distintos tipos de sonidos. Podemos encontrarnos con sonidos periódico simples (tonos puros), que se componen de una única frecuencia, como por ejemplo el sonido de un diapasón (figura 2.4); sonidos periódico complejos que se componen de una frecuencia fundamental y un conjunto de frecuencias múltiplos de esta (figura 2.5); el sonido aleatorio, denominado coloquialmente como ruido, que se compone de distintas frecuencias de valor impredecible presentando un espectro continuo (figura 2.6); y por último el sonido transitorio, de aparición repentina y de breve duración (figura 2.7)

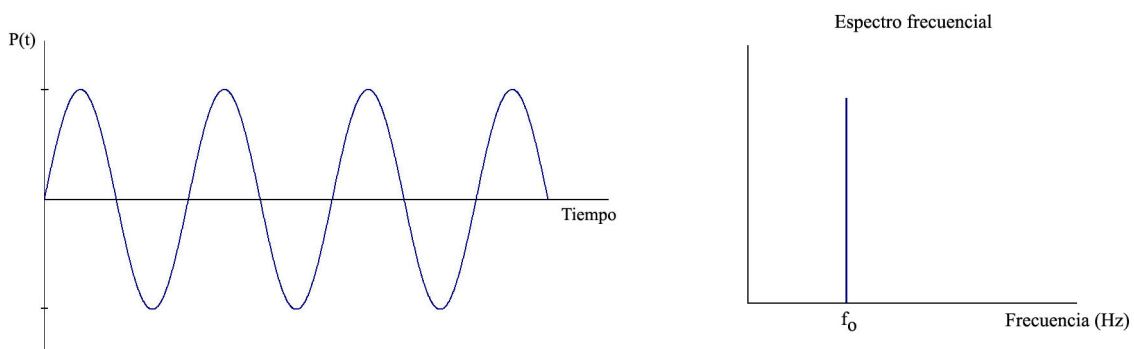


Figura 2.4. Sonido periódico simple.

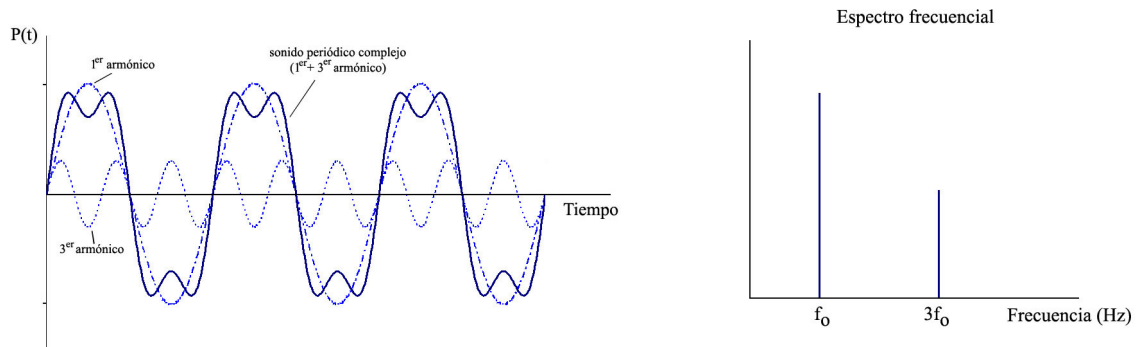


Figura 2.5. Sonido periódico complejo

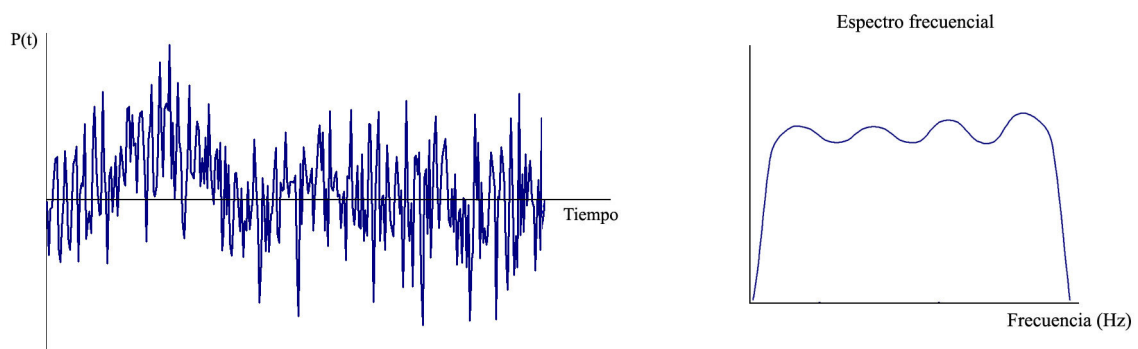


Figura 2.6. Sonido aleatorio.

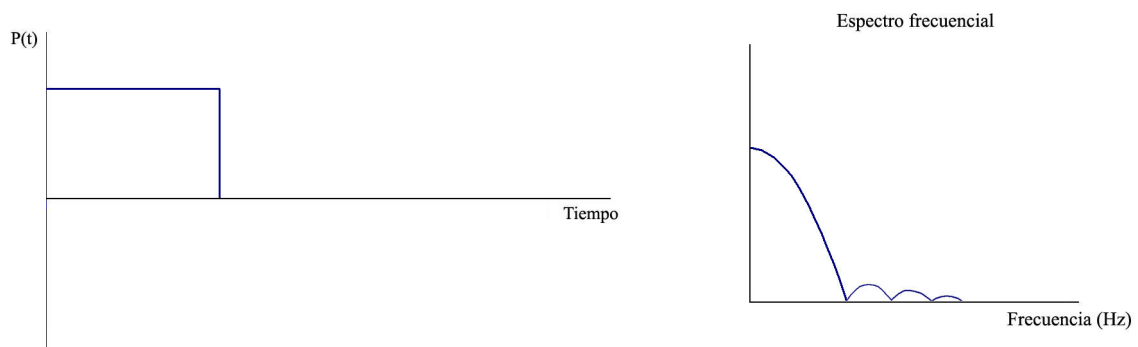


Figura 2.7. Sonido transitorio.

El análisis espectral, estudia el contenido energético de un sonido en función de la frecuencia dentro del espectro audible (para el oído humano sonidos de frecuencias comprendidas entre los 16 Hz y los 16000 Hz), para ello se divide el rango audible en distintos márgenes de frecuencias, denominado ancho de banda nominal. La anchura de banda nominal es la diferencia entre dos frecuencias, llamadas frecuencias de corte,

pudiendo ser esta diferencia constante o variable. En el último caso el ancho de banda es proporcional a la frecuencia distinguiendo dos casos:

1. Banda de octava: La frecuencia de corte superior es el doble de la frecuencia de corte inferior:

$$\frac{f_2}{f_1} = 2$$

2. Banda de tercio de octava: La banda de octava es dividida entre intervalos, de forma que la relación entre frecuencias de corte es:

$$\frac{f_2}{f_1} = \sqrt[3]{2}$$

En cualquiera de las dos bandas, la frecuencia central es la media geométrica de las frecuencias de corte:

$$f_c = \sqrt{f_1 \cdot f_2}$$

En la tabla 2.1 se indican los valores anteriores para ambas bandas según recoge la norma UNE 74002 y la ISO 266 y de forma gráfica, en la figura 2.8, a modo de ejemplo, se muestra la descomposición de un sonido en bandas de octava y tercios de octava.

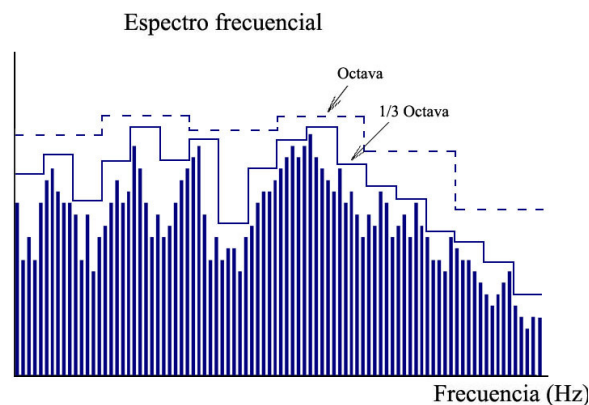


Figura 2.8. Descomposición de un sonido en bandas de octava y tercios de octava.



| Frecuencias (Hz)    |                    |                     |                          |                        |                        |
|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|
| Bandas de Octava    |                    |                     | Bandas Tercios de Octava |                        |                        |
| Frecuencia inferior | Frecuencia central | Frecuencia superior | Frecuencia inferior      | Frecuencia central     | Frecuencia superior    |
| 11                  | 16                 | 22                  | 14,1<br>17,8<br>22,4     | 16<br>20<br>25         | 17,8<br>22,4<br>28,2   |
| 22                  | 31,5               | 44                  | 28,2<br>35,5<br>44,7     | 31,5<br>40<br>50       | 33,5<br>47,7<br>56,2   |
| 44                  | 63                 | 88                  | 56,2<br>70,8<br>89,1     | 63<br>80<br>100        | 70,8<br>89,1<br>112    |
| 88                  | 125                | 177                 | 112<br>141<br>178        | 125<br>160<br>200      | 141<br>178<br>224      |
| 177                 | 250                | 355                 | 224<br>282<br>355        | 250<br>315<br>400      | 282<br>355<br>447      |
| 355                 | 500                | 740                 | 447<br>562<br>708        | 500<br>630<br>800      | 562<br>708<br>891      |
| 700                 | 1000               | 1420                | 891<br>1122<br>1413      | 1000<br>1250<br>1600   | 1122<br>1413<br>1773   |
| 1420                | 2000               | 2840                | 1773<br>2239<br>2818     | 2000<br>2500<br>3150   | 2239<br>2818<br>3548   |
| 2840                | 4000               | 5680                | 3548<br>4467<br>5623     | 4000<br>5000<br>6300   | 4467<br>5623<br>7079   |
| 5680                | 8000               | 11300               | 7079<br>8913<br>11220    | 8000<br>10000<br>12500 | 8913<br>11220<br>14180 |
| 11360               | 16000              | 22720               | 17780                    | 20000                  | 22890                  |

Tabla 2.1. Frecuencias en bandas de octava y tercios de octava.

Ahora bien, la utilización del valor eficaz en la determinación de la presión sonora da lugar a una serie de problemas que se fundamentan en el comportamiento del oído humano:

- La gama de presiones a las que responde el oído, desde el valor umbral de audición hasta el umbral del dolor es amplia, por ejemplo, la presión eficaz más débil que puede ser detectada por una persona, a la frecuencia de 1 kHz, es de 20  $\mu\text{Pa}$ , mientras que el umbral del dolor tiene lugar a una presión eficaz del orden de 100 Pa (milésima parte de la presión atmosférica  $P_o = 10^5$  Pa), lo que implica que si se utiliza una escala lineal el rango es muy amplio (de 1 a 5.000.000).
- Por otra parte, el oído no responde linealmente a los estímulos que recibe, sino que lo hace de forma logarítmica (ley de Weber-Fechner). Por ejemplo, si la presión de un tono puro de 1 kHz se dobla, la sensación subjetiva (o sonoridad) producida por el mismo no llega a ser del doble.

Estas causas justifican el uso de una escala logarítmica para la representación de la presión sonora, expresándose en valores relativos respecto a un valor de referencia. La unidad de presión sonora eficaz tomada como referencia se corresponde con el umbral de audición a 1 kHz, siendo esta presión de 20  $\mu\text{Pa}$ . De esta forma se habla de niveles de presión sonora, obteniéndose los mismos a partir de la expresión:

$$L_p = 20 \cdot \log \frac{P}{P_o}$$

Siendo la unidad utilizada el decibelio (dB). De esta forma reduce el rango de presiones sonoras de 20  $\mu\text{Pa}$ -100 Pa, a una escala que va desde los 0 dB hasta aproximadamente 135 dB, donde 0 dB representa una presión igual al umbral de audición y 135 dB el umbral aproximado de dolor. En la tabla 2.2 se muestran distintos niveles de presión sonora correspondientes a diferentes sonidos:

| Fuente sonora                         | Nivel de presión sonora | Valoración subjetiva |
|---------------------------------------|-------------------------|----------------------|
| Avión despegando                      | 120 dB                  | Muy elevado          |
| Discoteca                             | 110 dB                  |                      |
| Martillo neumático                    | 100 dB                  |                      |
| Estación tren/metro                   | 90 dB                   | Elevado              |
| Calle concurrida                      | 80 dB                   |                      |
| Conversación<br>(hablando alto)       | 70 dB                   |                      |
| Comercio<br>Conversación<br>(normal)  | 60 dB                   | Moderado             |
| Oficinas                              | 50 dB                   |                      |
| Sala conferencias                     | 40 dB                   |                      |
| Aula silenciosa<br>Dormitorio (noche) | 30 dB                   | Bajo                 |
| Sala de música<br>Estudios grabación  | 20 dB                   |                      |

Tabla 2.2. Valores típicos de niveles sonoros.

En el caso en que coexisten más de una fuente sonora, el nivel resultante en un punto alejado de dichas fuentes se obtiene por medio de la expresión:

$$L_p = 10 \cdot \log \left( \sum_{i=1}^n 10^{L_{p_i}/10} \right)$$

Donde  $L_{p_i}$ , se corresponde con el nivel de presión sonora que crea la fuente  $i$ .

En el caso en que se tengan solo dos fuentes sonoras, el nivel de presión total es:

$$L_p = 10 \cdot \log(10^{L_{p_1}/10} + 10^{L_{p_2}/10})$$

y si generan los mismos niveles de presión sonora ( $L_{p_1} = L_{p_2}$ ) se tiene:

$$L_p = 10 \cdot \log(2 \cdot 10^{L_{p_1}/10}) = 10 \cdot \log 2 + 10 \cdot \log 10^{L_{p_1}/10} = 3 + L_{p_1}$$

Por lo que se puede afirmar que cuando se tienen dos fuentes emitiendo con el mismo nivel de presión sonora, el nivel de presión sonora total es igual al de una fuente incrementada en 3 dB.

Por otra parte para la sustracción de dos niveles sonoros se utiliza la expresión:

$$L_p = 10 \cdot \log(10^{L_{p1}/10} - 10^{L_{p2}/10})$$

Expresión que permitiría eliminar el ruido de fondo. Por ejemplo, si se quisiera conocer el nivel sonoro de una fuente sonora dentro de un ambiente ruidoso (por ejemplo el ruido de una máquina), se podrían medir los niveles sonoros cuando está en funcionamiento la fuente sonora, y cuando no está en funcionamiento (para medir el sonido ambiental). De esta forma sustrayendo estos dos niveles, se tendría el nivel de presión sonora que emite la fuente sonora sin tener en cuenta el efecto del sonido ambiental.

## 2.2. MEDIDA SUBJETIVA DEL SONIDO

El sonido, por tratarse de una sensación, es un fenómeno subjetivo; y si se trata de evaluar las molestias producidas por el ruido, aparecen unas determinadas características:

- Cuanto más intenso es el ruido más molestia origina.
- A frecuencias elevadas, por encima de 1000 Hz, los sonidos resultan más molestas que a las frecuencias bajas, molestando especialmente los tonos puros.
- Para niveles de presión sonora bajos, el oído es muy insensible a bajas frecuencias, y presenta cierta atenuación a altas frecuencias.
- A medida que los niveles sonoros aumentan, el oído responde de forma más homogénea en toda la banda de frecuencias audibles.
- Los ruidos intermitentes o irregulares son más molestos que los continuos.

Resulta, por tanto, comprensible afirmar que es extremadamente difícil encontrar un único parámetro que recoja el grado de molestia. A continuación, se enumeran algunas herramientas útiles para valorar la molestia ocasionada por el ruido.

Para sonidos puros se puede acudir a las curvas isofónicas (figura 2.9) , elaboradas por Fletcher y Munson a base de experimentar con muchos oídos sanos de personas comprendidas entre los 18 y los 25 años. Estas curvas representan diferentes estados posibles para un mismo nivel de sensación sonora. A lo largo de cualquier curva, los sonidos tienen la misma sonoridad. El fonio es la unidad para representar el nivel de sonoridad  $L_n$ , y equivale al dB mientras se refiera a la frecuencia de 1000 Hz.

La norma UNE-5-100-87 contiene otra magnitud: la sonoridad, representada con la letra N, su unidad recibe el nombre de sonio. Para uso práctico, se ha adoptado una relación normalizada entre sonoridad y nivel de sonoridad que puede encontrarse en la UNE 74-010-76. Por otra parte, en la UNE 74-014-78 se exponen dos métodos de cálculo para la sonoridad de un sonido complejo analizado en bandas de octava y en bandas de tercios de octava. En la figura 2.10 (fuente: H. Arau. “ABC de la Acústica Arquitectónica”) se muestra la tabla de correlación por frecuencias de los niveles de presión sonora (en dB) con los sonios.

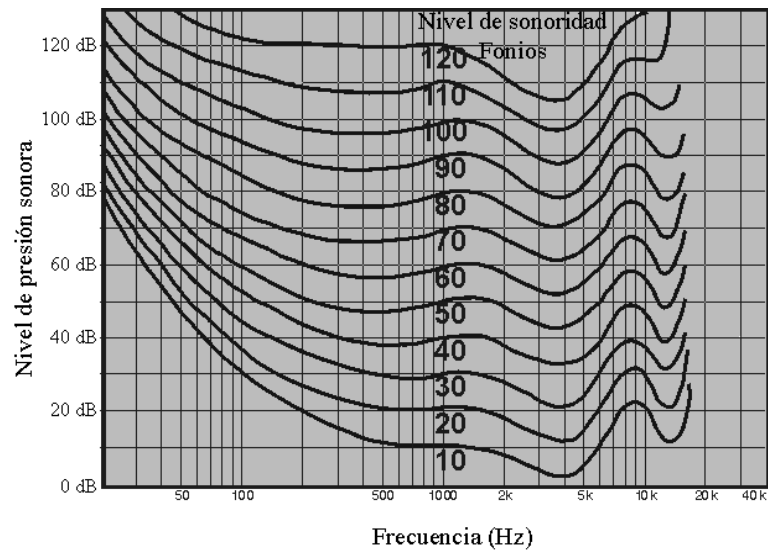


Figura 2.9. Isolíneas de igual sonoridad de Fletcher-Munson

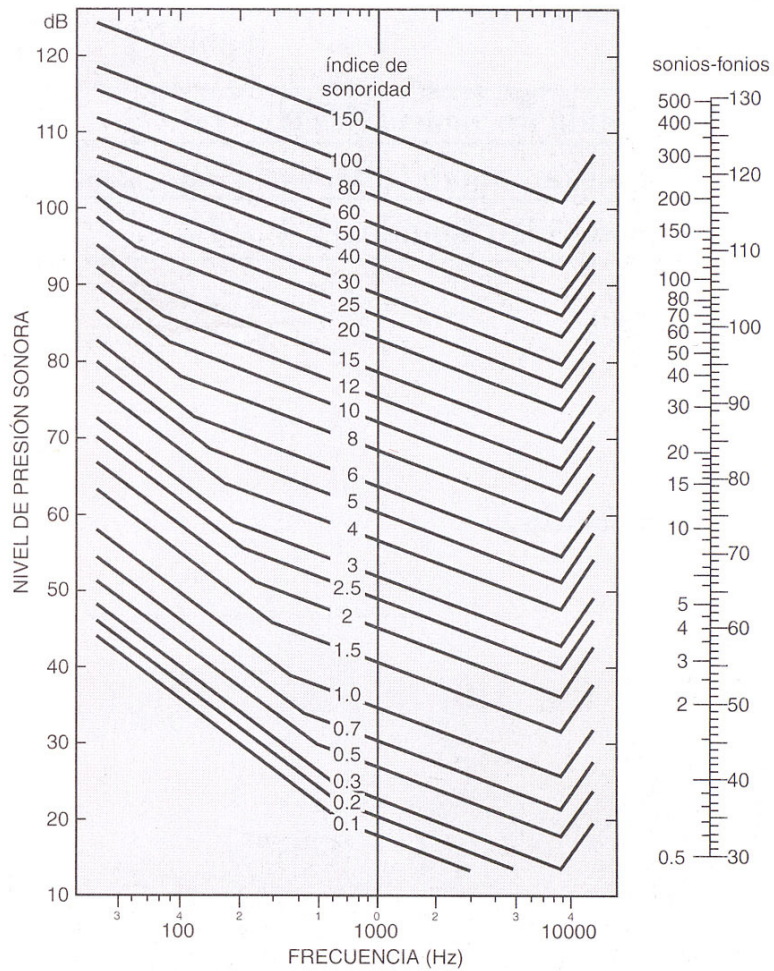


Figura 2.10. Sonoridad en relación al nivel de presión sonora y la frecuencia.

La medida de la percepción sonora con las escalas del sonio o el fonio no es fácil. Un método ampliamente utilizado es penalizar el nivel de presión sonora en función de la frecuencia. De esta forma para cada frecuencia del espectro audible se aplica un nivel de corrección, lo que se denomina ponderación frecuencial. Existen diferentes tipos de ponderación (“A”, “B” y “C”) con el objetivo de aproximar la respuesta del oído humano a diferentes niveles de presión sonora, pero la mas utilizada es la ponderación A, por ser la que mas se ajusta a la respuesta del oído, y en este caso, los valores de los niveles de presión sonora o de otros parámetros se dan en dBA (decibelios tipo A). Estas ponderaciones recogidas en la UNE 20-464-90 se muestran en la tabla 2.3, o bien de forma gráfica en la figura 2.11.

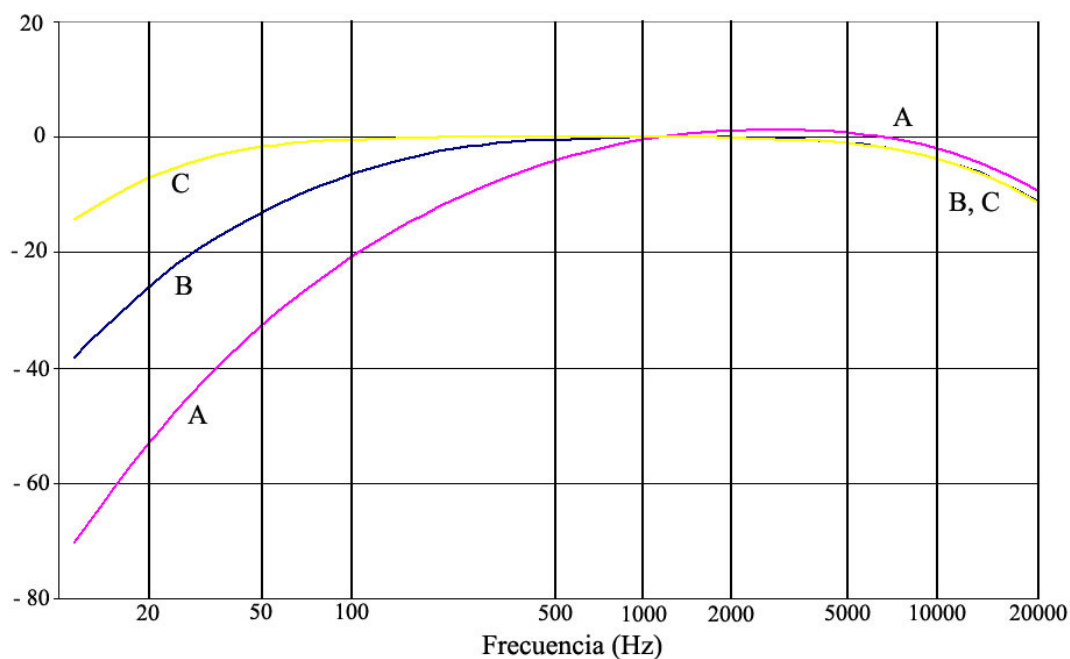


Figura 2.11. Ponderación frecuencial A,B, C.

| <b>Frecuencia<br/>Nominal (Hz)</b> | <b>Frecuencia<br/>Exacta (Hz)</b> | <b>Ponderación<br/>A</b> | <b>Ponderación<br/>B</b> | <b>Ponderación<br/>C</b> |
|------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 10                                 | 10.00                             | -70.4                    | -38.2                    | -14.3                    |
| 12.5                               | 12.59                             | -63.4                    | -33.2                    | -11.2                    |
| 16                                 | 15.85                             | -56.7                    | -28.5                    | -8.5                     |
| 20                                 | 19.95                             | -50.5                    | -24.2                    | -6.2                     |
| 25                                 | 25.12                             | -44.7                    | -20.4                    | -4.4                     |
| 31.5                               | 31.62                             | -39.4                    | -17.1                    | -3.0                     |
| 40                                 | 39.81                             | -34.6                    | -14.2                    | -2.0                     |
| 50                                 | 50.12                             | -30.2                    | -11.6                    | -1.3                     |
| 63                                 | 63.10                             | -26.2                    | -9.3                     | -0.8                     |
| 80                                 | 79.43                             | -22.5                    | -7.4                     | -0.5                     |
| 100                                | 100.0                             | -19.1                    | -5.6                     | -0.3                     |
| 125                                | 125.9                             | -16.1                    | -4.2                     | -0.2                     |
| 160                                | 158.5                             | -13.4                    | -3.0                     | -0.1                     |
| 200                                | 199.5                             | -10.9                    | -2.0                     | -0.0                     |
| 250                                | 251.2                             | -8.6                     | -1.3                     | -0.0                     |
| 315                                | 316.2                             | -6.6                     | -0.8                     | -0.0                     |
| 400                                | 398.1                             | -4.8                     | -0.5                     | -0.0                     |
| 500                                | 501.2                             | -3.2                     | -0.3                     | -0.0                     |
| 630                                | 631                               | -1.9                     | -0.1                     | -0.0                     |
| 800                                | 794.3                             | -0.8                     | -0.0                     | -0.0                     |
| 1000                               | 1000                              | 0                        | 0                        | 0                        |
| 1250                               | 1259                              | +0.6                     | -0.0                     | -0.0                     |
| 1600                               | 1585                              | +1.0                     | -0.0                     | -0.0                     |
| 2000                               | 1995                              | +1.2                     | -0.1                     | -0.2                     |
| 2500                               | 2512                              | +1.3                     | -0.2                     | -0.3                     |
| 3150                               | 3162                              | +1.2                     | -0.4                     | -0.5                     |
| 4000                               | 3981                              | +1.0                     | -0.7                     | -0.8                     |
| 5000                               | 5012                              | +0.5                     | -1.2                     | -1.3                     |
| 6300                               | 6310                              | -0.1                     | -1.9                     | -2.0                     |
| 8000                               | 7943                              | -1.1                     | -2.9                     | -3.0                     |
| 10000                              | 10000                             | -2.5                     | -4.3                     | -4.4                     |
| 12500                              | 12590                             | -4.3                     | -6.1                     | -6.2                     |
| 16000                              | 15850                             | -6.6                     | -8.4                     | -8.5                     |
| 20000                              | 19950                             | -9.3                     | -11.1                    | -11.2                    |

Tabla 2.3. Ponderación frecuencial A, B y C.



Otro tipo de ponderación a la que está sometida el sonido es la ponderación temporal, que tiene en cuenta la continuidad/discontinuidad del ruido en función del tiempo. Los sonómetros (dispositivos utilizados para medir los niveles de presión sonora), incluyen cuatro tiempos de integración: el modo rápido (o FAST) que registra las fluctuaciones sonoras cada 125 milisegundos., el lento (o SLOW: ) que registra las fluctuaciones aproximadamente cada segundo, el modo impulso (o IMPULSE) que registra fluctuaciones cada 35 milisegundos, midiendo la respuesta del oído ante sonidos de corta duración y por último el modo pico (o PEAK) con un intervalo entre 50 y 100 microsegundos. De esta forma el tiempo de respuesta del sonómetro frente a una señal varía en función del tiempo. La norma ISO indica cual es el mejor modo de integración para cada caso.

Para tener en cuenta las fluctuaciones temporales y realizar una valoración del ruido ambiental, la norma ISO 1996 recoge diferentes parámetros teniendo en cuenta la valoración del contenido energético. Entre otros parámetros se utiliza el nivel sonoro continuo equivalente ( $L_{Aeq,T}$ ) y dentro del marco de la Unión Europea se utiliza el nivel equivalente día-tarde-noche ( $L_{DEN}$ ).

### 2.3 NIVEL SONORO CONTINUO EQUIVALENTE

Se representa por  $L_{Aeq,T}$  y se corresponde al valor del nivel de presión sonora en dBA, de un sonido hipotético estable, que, en un intervalo de tiempo  $T$ , posee la misma presión sonora cuadrática media que el sonido que se mide y cuyo nivel varía con el tiempo. De acuerdo con esto, y según se expresa en la norma ISO1996, su expresión matemática es:

$$L_{Aeq,T} = 10 \cdot \log \left( \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{P(t)^2}{P_0^2} dt \right)$$

donde:

$L_{Aeq,T}$ , es el nivel sonoro continuo en dBA, determinado en el intervalo de tiempo  $T$ , entre los instantes  $t_1$  y  $t_2$ .

$P_0$ , es la presión de referencia (20  $\mu$ Pa).

$P(t)$  es la presión sonora instantánea en la red de ponderación A de la señal sonora.

A modo de ejemplo, en la figura 2.12, se muestra graficados los niveles equivalentes de 1 segundo ( $L_{Aeq,1s}$ ), de 1 minuto ( $L_{Aeq,1m}$ ) y el correspondiente a un sonido con una duración de 5 minutos ( $L_{Aeq,5m}$ ). Asimismo, para un período de tiempo mayor, en la figura 2.13 se muestran las fluctuaciones en niveles sonoros equivalentes de una hora ( $L_{Aeq,1h}$ ) para el sonido registrado en una calle cualquiera a lo largo de las 24 horas del día superpuesto al nivel equivalente de ese día ( $L_{Aeq,24h}$ ).

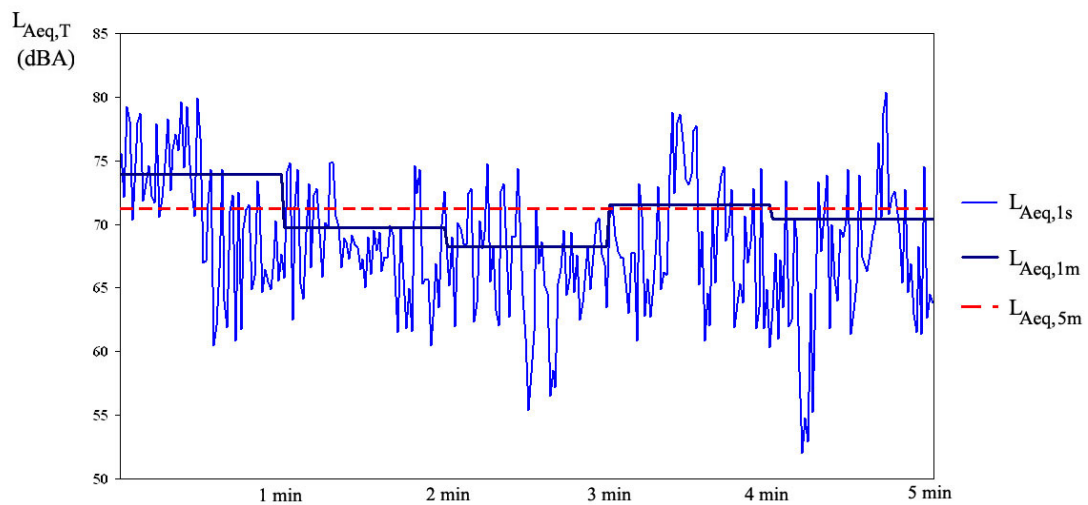


Figura 2.12. Gráfica de niveles equivalentes de 1 segundo, 1 minuto y cinco minutos.

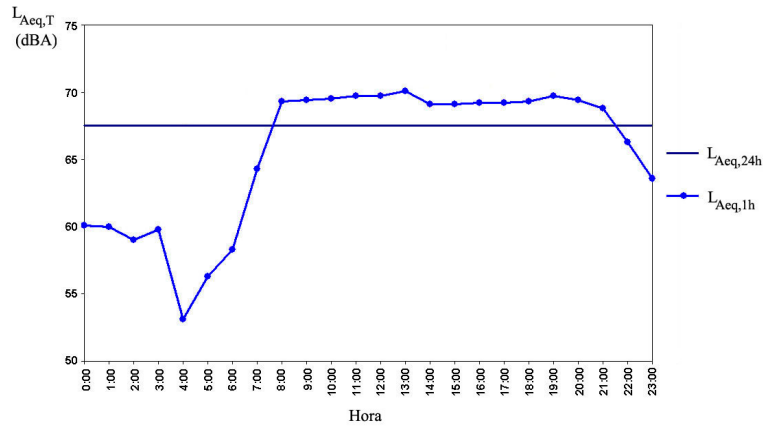


Figura 2.13. Gráfica de niveles equivalentes de 1 hora y 24 horas.

De forma discreta, y a modo de ejemplo, si se dispone de medidas de nivel continuo equivalente de una hora de duración ( $L_{Aeq,1h}$ ), el nivel equivalente correspondiente a un número determinado de horas se obtiene a partir de la expresión:

$$L_{Aeq,N\text{ horas}} = 10 \cdot \log \left( \frac{\sum_{i=1}^{i=N} 10^{L_{Aeq_i,1h}}}{N} \right)$$

Donde,

$N$ , es el número de horas

$L_{Aeq_i,1h}$ , es el nivel equivalente (de una hora de duración) correspondiente a cada una de las horas contempladas en el período de  $N$  horas.

De esta forma para las 24 horas del día se tiene:

$$L_{Aeq,24\text{ horas}} = 10 \cdot \log \left( \frac{10^{L_{Aeq_1,1h}} + 10^{L_{Aeq_2,1h}} + 10^{L_{Aeq_3,1h}} + \dots + 10^{L_{Aeq_{24},1h}}}{24} \right)$$

Donde,

$L_{Aeq_1,1h}$  sería el nivel equivalente de la hora que va desde las 0:00h hasta las 1:00 horas;

$L_{Aeq_2,1h}$  sería el nivel equivalente de la hora que va desde las 1:00h hasta las 2:00;

$L_{Aeq_3,1h}$  sería el nivel equivalente de la hora que va desde las 2:00h hasta las 3:00

y así sucesivamente hasta el nivel equivalente correspondiente a la hora que va desde las 23:00 hasta las 24:00 horas ( $L_{Aeq_{24},1h}$ ).

De la misma forma si se tuvieran medidas de niveles sonoros de 1 minuto de duración,  $L_{Aeq,1m}$ , el nivel sonoro de una hora se determinaría a partir de las 60 medidas de un minuto a partir de:

$$L_{Aeq,1hora} = 10 \cdot \log \left( \frac{\sum_{i=1}^{i=60} 10^{L_{Aeq_i,1m}}}{60} \right)$$

Para otros períodos discretos, se procede de forma análoga.

## 2.4 NIVEL EQUIVALENTE DAY-EVENING-NIGHT.

Se representa por  $L_{DEN}$  y es el indicador de ruido para evaluar la molestia ocasionada por el ruido; demostrándose que si éste disminuye también se reducirá el número de personas que sufren los efectos dañinos sobre la salud. Se determina aplicando la fórmula:

$$L_{DEN} = 10 \log \left( \frac{12 \cdot 10^{\frac{L_{day}}{10}} + 4 \cdot 10^{\frac{L_{evening} + 5}{10}} + 8 \cdot 10^{\frac{L_{night} + 10}{10}}}{24} \right)$$

Donde,

$L_{DAY}$ , es el nivel sonoro medio a largo plazo (ponderado A) correspondiente a lo largo de todos los periodos diurnos (desde 7:00 h hasta 19:00 h) de un año

$L_{EVENING}$ , es el nivel sonoro medio a largo plazo (ponderado A) correspondiente a lo largo de todos los periodos tarde (desde 19:00 h hasta 23:00 h) de un año.

$L_{NIGHT}$ , es el nivel sonoro medio a largo plazo (ponderado A) correspondiente a lo largo de todos los periodos noche (desde 23:00 h hasta 7:00 h) de un año.

Para su determinación la Normativa Europea establece la posibilidad de realizar simulaciones o bien recurrir a mediciones in situ. En el último caso el coste (tanto humano como económico) de las mediciones realizadas a lo largo de un año sería muy elevado, por lo que es práctica habitual recurrir a estimaciones a partir de mediciones de menor duración. El presente trabajo pretende establecer las características de cada uno de los niveles  $L_{DEN}$ ,  $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$ ,  $L_{NIGHT}$ , correspondientes a distintos entornos urbanos intentando establecer características comunes, de forma que también podamos relacionarlos entre sí y estimar con una mejor precisión cada uno de estos niveles a partir de medidas de menor duración.

### 3. DESCRIPCIÓN ENTORNO DE MEDIDA

Se dispone de niveles sonoros correspondientes a la ciudad de Madrid. (Madrid es la capital de España y de la Comunidad de Madrid, situada en la zona central de la Península Ibérica, con una población aproximada de 3.132.463 habitantes, siendo la mayor ciudad del país y la tercera urbana de la Unión Europea. Como capital de la nación, Madrid alberga las sedes del Gobierno, Cortes, principales centros de la Administración pública central, Instituciones y Organismos del Estado, así como la residencia oficial de los reyes de España). Dichos niveles sonoros se corresponden con medidas en continuo de niveles equivalentes ponderado A de una hora de duración ( $L_{eq,1h}$ ), durante las 24 horas del día, los 365 días del año y durante 5 años para cuatro estaciones de medida en ámbito urbano y una estación de medida en ámbito suburbano. En adelante distinguiremos entre las localizaciones A, B, C, D y E para diferenciar entre cada una de las estaciones de medición, siendo sus ubicaciones:

Estación A: Paseo de Recoletos esquina C/ Almirante.

Estación B: Plaza Doctor Marañón esquina C/ Miguel Ángel

Estación C: Plaza Marques de Salamanca esquina C/Ortega y Gasset.

Estación D: C/ Huerta de Castañeda esquina C/Higueras.

Estación E: Casa de Campo. Terminal de Teleférico.

Las características y descripción de cada una de las localizaciones es como sigue:

La localización A está situada en una zona peatonal de unos 15 metros de ancho paralela a una de las más importantes avenidas de la ciudad. Está considerada como un area comercial (principales oficinas centrales de la banca española, centro comercial y

la biblioteca nacional) con alta densidad de tráfico, siendo su nivel anual  $L_{DEN}$  de 74 dB. La localización B está situada también en la misma avenida que la localización A, pero a 3 km. de distancia en la intersección con otra importante avenida, de esta forma, la localización B tiene mayor densidad de tráfico que la localización A. Está considerada, también, como zona comercial y próxima a edificios gubernamentales. Su nivel anual  $L_{DEN}$  es de 75 dB. La localización C está situada en una gran rotonda intersección de dos calles. Está considerada como una zona comercial y residencial y localizada junto a un edificio de oficinas, siendo el nivel  $L_{DEN}$  anual de 69 dB. La localización D está localizada próxima a una calle con baja densidad de tráfico en una zona predominantemente residencial con niveles anuales  $L_{DEN}$  en torno a 67 dB. Por último, y en contraste con las localizaciones en ámbito urbano y con el objetivo de contrastar los resultados con una localización no urbana la localización E está situada en un entorno suburbano dentro de un parque natural, afectada ligeramente por el ruido de trenes y de un parque de atracciones. Está próxima también a un parque infantil de juegos y a un mirador de la ciudad. Su nivel anual  $L_{DEN}$  se sitúa en torno a los 56 dB.

Las variaciones de los niveles sonoros a lo largo de los cinco años de medición y para cada localización se muestran en las figuras 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4 para cada nivel sonoro.

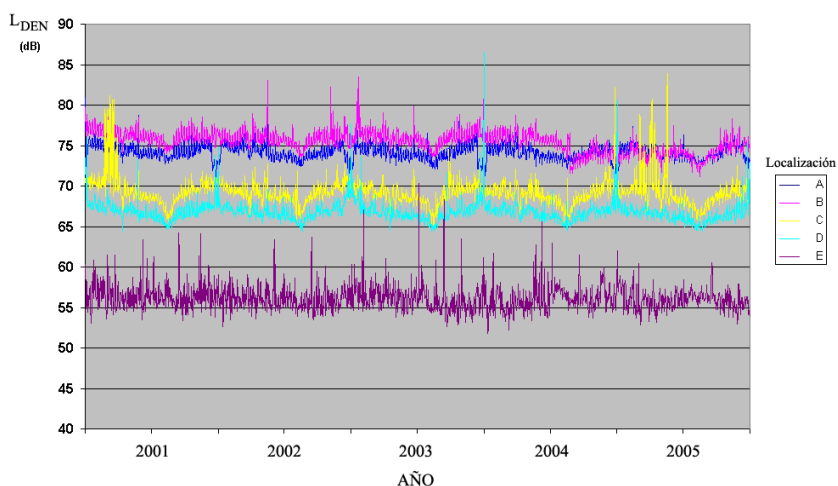


Figura 3.1. Evolución del nivel sonoro  $L_{DEN}$  en cada una de las localizaciones.

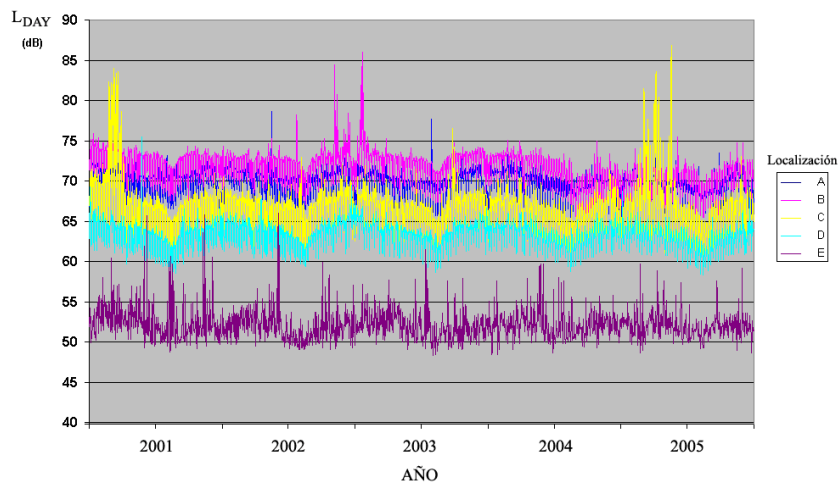


Figura 3.2. Evolución del nivel sonoro  $L_{DAY}$  en cada una de las localizaciones.

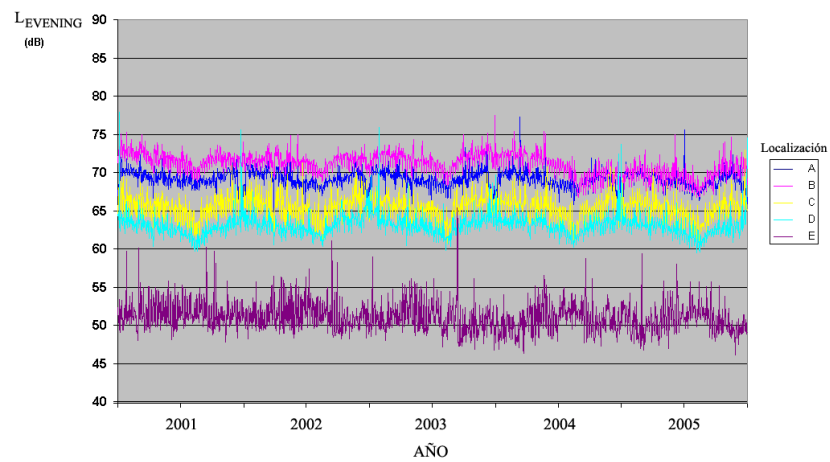


Figura 3.3. Evolución del nivel sonoro  $L_{EVENING}$  en cada una de las localizaciones.

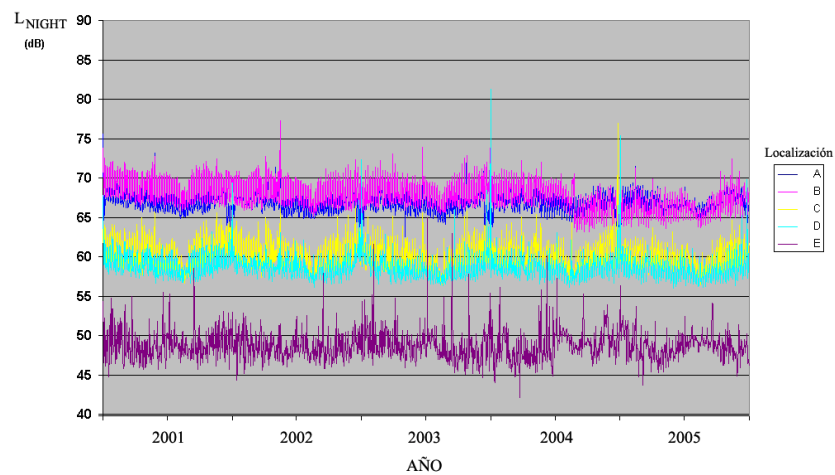




Figura 3.4. Evolución del nivel sonoro  $L_{NIGHT}$  en cada una de las localizaciones.



El primer análisis de estos datos revela que las medias mensuales siguen un ciclo anual en todas las localizaciones urbanas, mientras que no es tan claro en la localización suburbana. Asimismo, se encuentra que en la localización C este patrón estacional no se sigue exactamente en los años 2001 y 2005 (para algunos meses consecutivos) con desviaciones importantes respecto de los niveles que se esperarían. Posterior investigación sobre las razones de estas desviaciones mostraron que estas desviaciones fueron debidas a trabajos en la vía pública. Esta circunstancia podría ser importante en el sentido de que se pueden mostrar resultados distintos para esta localización (que presenta mayor variabilidad en los datos, o no sigue el patrón estacional) en comparación con las localizaciones que presentan menor variabilidad y mayor regularidad en el ciclo estacional anual.

Finalmente, a modo de resumen, se muestran las fichas individuales de cada localización que recogen las características más importantes así como fotografías, ubicación y enlaces a videos de descripción del entorno.

**Estación A. Paseo de Recoletos**


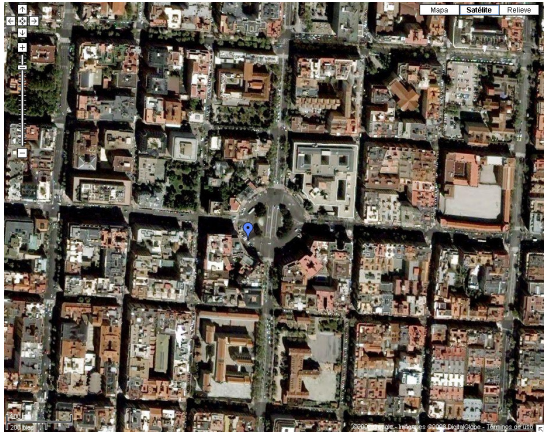
| Tipo de estación   | Tipo de Zona | Caracterización de la zona                                    |
|--|--------------|---|
| Tráfico intenso  | Urbana       | Comercial/Residencial   |
| <b>Entorno inmediato (0 a 100 m)</b>   |              | <b>Entorno local (100 m a pocos km.)</b>                      |
| Avenida con tráfico intenso.<br>Paseo con árboles.   |              | Urbano comercial. Urbano Residencial.<br>Tráfico rodado alto. |
| <b>Vistas</b>  |              |   |
|    |              |   |
| <b>Plano</b>   |              |   |
|    |              |   |
| <b>Video:</b> Estación A. <a href="http://es.youtube.com/watch?v=AWHJASg2Sms">http://es.youtube.com/watch?v=AWHJASg2Sms</a>  |              |   |
| <b>Otras características:</b> La distancia al edificio más cercano es superior a 0,5 metros. Punto de muestreo situado a 4 metros sobre el nivel del suelo. Situada a mas de 4 metros del centro del carril más próximo y a más de 25 metros de grandes cruces. Sin fuentes de interferencia. Acceso adecuado. Visibilidad adecuada. Ausencia de Impacto visual. |              |   |

**Estación B. Plaza Doctor Marañón**


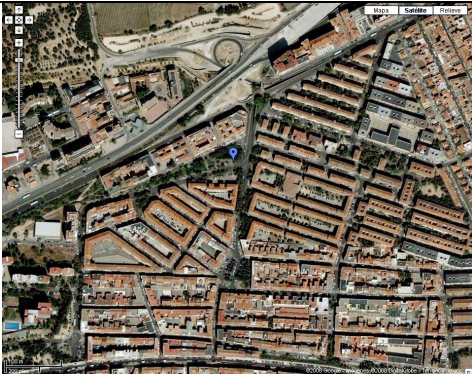
| Tipo de estación  | Tipo de Zona | Caracterización de la zona                                   |
|---|--------------|--|
| Tráfico intenso   | Urbana       | Comercial/Residencial  |
| <b>Entorno inmediato (0 a 100 m)</b>  |              | <b>Entorno local (100 m a pocos km.)</b>                     |
| Avenida con tráfico intenso.<br>Hotel. Oficinas. Árboles  |              | Urbano comercial. Urbano Residencial.<br>Tráfico rodado alto |
| <b>Vistas</b>   |              |  |
|   |              |  |
| <b>Plano.</b>   |              |  |
|   |              |  |
| <b>Video:</b> Estación B(I): <a href="http://www.youtube.com/v/7k6gQl8aNKo">http://www.youtube.com/v/7k6gQl8aNKo</a><br>Estación B(II): <a href="http://www.youtube.com/v/6N75EwDMGYQ">http://www.youtube.com/v/6N75EwDMGYQ</a><br>Estación B (III): <a href="http://www.youtube.com/v/njUm3efgewM">http://www.youtube.com/v/njUm3efgewM</a><br>Estación B(IV): <a href="http://www.youtube.com/v/RzHXbvJtrTE">http://www.youtube.com/v/RzHXbvJtrTE</a> |              |  |
| <b>Otras características:</b> La distancia al edificio más cercano es superior a 0,5 metros. Punto de muestreo situado a 4 metros sobre el nivel del suelo. Situada a mas de 4 metros del centro del carril más próximo. Sin fuentes de interferencia. Acceso adecuado. Visibilidad adecuada. Ausencia de Impacto visual.   |              |  |



**Estación C. Marqués de Salamanca**


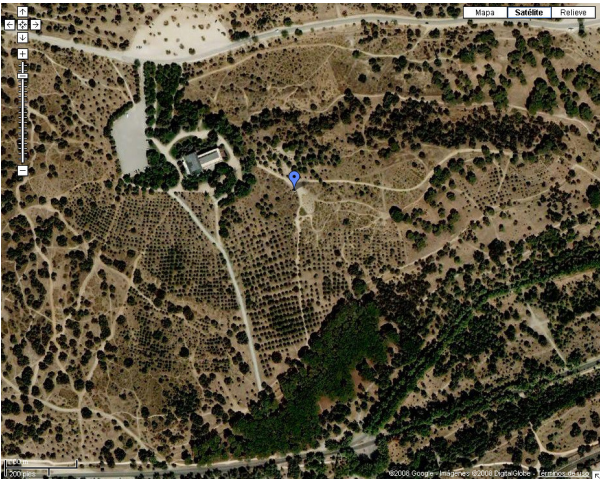
| Tipo de estación   | Tipo de Zona | Caracterización de la zona                               |
|--|--------------|--|
| Tráfico medio  | Urbana       | Comercial/Residencial                                    |
| <b>Entorno inmediato (0 a 100 m)</b>   |              | <b>Entorno local (100 m a pocos km.)</b>                 |
| Calle tráfico medio. Edificio oficinas.<br>Salida garaje público.  |              | Urbano comercial. Urbano Residencial.<br>Tráfico rodado. |
| <b>Vistas</b>  |              |  |
|   |              |  |
| <b>Plano</b>   |              |  |
|    |              |  |
| <b>Videos:</b> Estación C(I): <a href="http://www.youtube.com/v/JwISc1Tj_wo">http://www.youtube.com/v/JwISc1Tj_wo</a><br>Estación C(II): <a href="http://www.youtube.com/v/TS1b6UknbDs">http://www.youtube.com/v/TS1b6UknbDs</a><br>Estación C(III): <a href="http://www.youtube.com/v/ht4AEYE9S08">http://www.youtube.com/v/ht4AEYE9S08</a>                     |              |  |
| <b>Otras características:</b> La distancia al edificio más cercano es superior a 0,5 metros. Punto de muestreo situado a 4 metros sobre el nivel del suelo. Situada a mas de 4 metros del centro del carril más próximo y a más de 25 metros de grandes cruces. Sin fuentes de interferencia. Acceso adecuado. Visibilidad adecuada. Ausencia de Impacto visual. |              |  |

**Estación D. Alto de Extremadura**

| Tipo de estación   | Tipo de Zona | Caracterización de la zona   |
|--|--------------|--|
| Tráfico bajo   | Urbana       | Residencial  |
| <b>Entorno inmediato (0 a 100 m)</b>   |              | <b>Entorno local (100 m a pocos km.)</b>                                     |
| Calle tráfico bajo.<br>Viviendas.  |              | Urbano comercial. Urbano Residencial.<br>Tráfico rodado. Carretera nacional. |
| <b>Vistas</b>  |              |  |
|   |              |  |
| <b>Plano</b>   |              |  |
|    |              |  |
| <b>Videos:</b> Estación D(I): <a href="http://www.youtube.com/v/Fs33-eLexss">http://www.youtube.com/v/Fs33-eLexss</a><br>Estación D(II): <a href="http://www.youtube.com/v/Pf3f5qcWiQo">http://www.youtube.com/v/Pf3f5qcWiQo</a><br>Estación D(III): <a href="http://www.youtube.com/v/C9R15IaaL7s">http://www.youtube.com/v/C9R15IaaL7s</a>                     |              |  |
| <b>Otras características:</b> La distancia al edificio más cercano es superior a 0,5 metros. Punto de muestreo situado a 4 metros sobre el nivel del suelo. Situada a mas de 4 metros del centro del carril más próximo y a más de 25 metros de grandes cruces. Sin fuentes de interferencia. Acceso adecuado. Visibilidad adecuada. Ausencia de Impacto visual. |              |  |



**Estación E. Casa de Campo**

| Tipo de estación   | Tipo de Zona | Caracterización de la zona              |
|--|--------------|---|
| Tráfico nulo   | Suburbana    | Natural                                 |
| Entorno inmediato (0 a 100 m)  |              | Entorno local (100 m a pocos km.)       |
| Árboles. Mirador. Parque infantil  |              | Teleférico. Parque atracciones. Bosque. |
| Vistas   |              |   |
|   |              |   |
| Plano  |              |   |
|    |              |   |
| <b>Videos:</b> Estación E: <a href="http://www.youtube.com/v/muytSKSyUGw">http://www.youtube.com/v/muytSKSyUGw</a>   |              |   |
| <b>Otras características:</b> La distancia al edificio más cercano es superior a 0,5 metros. Punto de muestreo situado a 4 metros sobre el nivel del suelo. Sin fuentes de interferencia. Acceso adecuado. Visibilidad adecuada. Ausencia de Impacto visual. |              |   |



## 4. COMPARACIÓN DE NIVELES SONOROS

### 4.1. INTRODUCCIÓN

Para la determinación del valor promedio anual del nivel  $L_{DEN}$  (en adelante  $L_{DEN,anual}$ ), la normativa Europea [1] establece la posibilidad de realizar simulaciones o bien realizar mediciones. Si nos centramos en la base de realizar técnicas de medición, es práctica habitual realizar medidas de corta duración, bien en un determinado tiempo dentro de la franja diurna, (variando los tiempos de medición en unos casos y otros desde minutos hasta horas [2–9]), bien midiendo las 24 horas del día [10–13] o bien en períodos más amplios de tiempo [14,15, 18-20], que en ningún caso abarcan varios períodos anuales. De esta forma, a partir de estas medidas (de menor duración), se extrapolan los resultados a mayor duración como consecuencia del coste que implica la toma de medidas de larga duración. De hecho, pocos son los estudios [16, 21] donde se analice la variabilidad de los indicadores con datos de larga duración en continuo para períodos que comprendan varios años. De esta forma se ha creído conveniente y dada la base de datos de que se dispone analizar la evolución temporal de los niveles  $L_{DEN}$ ,  $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$  y  $L_{NIGHT}$  de larga duración en distintas ubicaciones con diferentes condiciones en las fuentes de ruido. De esta forma, tras evaluar la variabilidad que presentan estos niveles, se puede observar si presentan las mismas características y determinar la incertidumbre que se comete al tomar períodos más cortos de medición, cuantificando el posible error cometido y analizando la dispersión de los datos, de forma que sirva como referencia a la hora de cuantificar el error cometido al tomar medidas de menor duración.



En este análisis no sólo se pretende observar la tendencia que presentan los niveles sonoros y determinar las características que presentan los indicadores en distintos puntos de medición, sino que también se pretende evaluar el nivel  $L_{DEN}$  a partir de la medición de niveles correspondientes a franjas horarias distintas ( $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$ ,  $L_{NIGHT}$ ) de forma que se pueda indicar cual de los tres niveles es más apropiado en el caso de realizar una estimación del nivel  $L_{DEN}$  a partir de una franja horaria concreta (día, tarde o noche). Para ello se analizarán las series temporales correspondientes a las diferencias  $L_{DEN} - L_{DAY}$ ,  $L_{DEN} - L_{EVENING}$ ,  $L_{DEN} - L_{NIGHT}$ , y de forma complementaria también se analizarán las diferencias  $L_{DAY} - L_{EVENING}$  y  $L_{DAY} - L_{NIGHT}$ .

Por último se pretende analizar si los valores diarios de los niveles en larga duración  $L_{DEN}$ ,  $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$  y  $L_{NIGHT}$  sufren variaciones significativas cuando llegan los fines de semana y en días festivos, por lo que se decide realizar una comparación entre la evolución de los niveles al tomar todos los días del año (lunes-domingo) respecto de tomar sólo los días laborables (de lunes a viernes excluyendo festivos) con el objetivo de comparar ambas series y establecer si existe una mejora en la estimación de los niveles cuando se toman solo los días laborables de forma que se pueda evaluar el error cometido al excluir en la medición los datos correspondientes a los fines de semana, lo que podría corroborar resultados obtenidos para medidas de menor duración [17-18, 23].

## 4.2 ANÁLISIS PREVIO DE LOS NIVELES $L_{DEN}$ , $L_{DAY}$ , $L_{EVENING}$ y $L_{NIGHT}$ .

En la tabla 4.1 pueden observarse los niveles anuales correspondientes al nivel  $L_{DEN}$  para cada uno de los años de que se dispone información. A partir de la misma puede observarse que los niveles anuales no sufren una variación significativa de un año a otro, si bien para la localización B, se observa una disminución en los niveles en los años 2004 y 2005.

| <b>Localización</b> | <b>Año 2001</b> | <b>Año 2002</b> | <b>Año 2003</b> | <b>Año 2004</b> | <b>Año 2005</b> |
|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| <b>A</b>            | 74,44           | 74,25           | 74,18           | 74,01           | 73,99           |
| <b>B</b>            | 76,30           | 75,92           | 76,09           | 75,08           | 74,10           |
| <b>C</b>            | 69,71           | 69,18           | 69,00           | 68,95           | 69,30           |
| <b>D</b>            | 66,96           | 66,89           | 66,85           | 66,76           | 66,43           |
| <b>E</b>            | 56,53           | 56,12           | 56,18           | 56,12           | 55,92           |

Tabla 4.1. Promedio anual (dB) correspondiente al nivel  $L_{DEN}$  en distintas localizaciones

Asimismo, también se observa la diferencia en los niveles entre cada una de las localizaciones como consecuencia de la diferencia en las condiciones de la fuente sonora. Sin embargo esta apariencia, más o menos estable, o de mínima variación, contrasta al tomar promedios mensuales pues, en este caso, se observa una estacionalidad anual (también encontrada por otros autores [18, 22]), presente en todas las estaciones, con la excepción de la localización E que es la única localización que no esta afectada por el ruido debido al tráfico urbano y que tiene niveles muy bajos comparativamente a las otras estaciones. Como ejemplo, en la figura 4.1, se muestra los niveles mensuales correspondientes a la localización D a lo largo de los cinco años de medición. (Para el resto de localizaciones consultar los anexos).

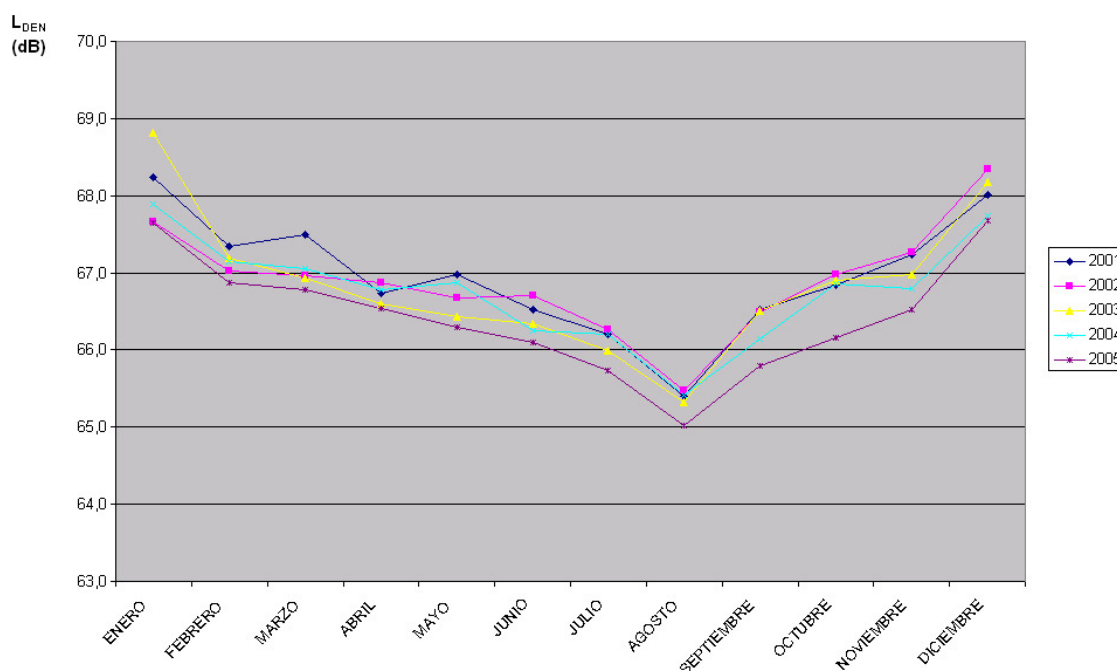


Figura 4.1. Niveles mensuales  $L_{DEN}$  en distintos años en la localización D.

De forma numérica, en la tabla 4.2 se muestra el rango de variación entre el mes con mayor nivel sonoro y el mes de menor nivel sonoro en diferentes años.

| Localización | Año 2001    | Año 2002    | Año 2003    | Año 2004    | Año 2005    |
|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| A            | [75,1-73,6] | [75,0-73,2] | [75,0-73,0] | [75,0-73,1] | [75,0-72,8] |
| B            | [77,2-74,9] | [76,4-74,5] | [77,0-74,5] | [76,4-73,1] | [75,2-72,6] |
| C            | [73,7-67,0] | [70,1-67,4] | [69,9-66,7] | [70,7-66,8] | [72,3-66,6] |
| D            | [68,2-65,4] | [68,3-65,5] | [68,8-65,3] | [67,9-65,4] | [67,7-65,0] |
| E            | [57,0-56,0] | [56,5-55,3] | [57,1-55,2] | [57,4-55,2] | [57,0-55,3] |

Tabla 4.2. Rango de las medias mensuales (dB) correspondientes al nivel  $L_{DEN}$ .

A la vista de estos datos, se podría indicar que el margen de error a la hora de predecir el valor anual del nivel  $L_{DEN}$  depende del mes donde se realice la medición y por lo general el margen de variabilidad de los niveles mensuales respecto del valor medio anual no es el mismo para las distintas localizaciones. Si se compara los márgenes mensuales dados por la tabla 4.2 con los valores del promedio anual para el nivel  $L_{DEN}$  dados por la tabla 4.1, se observa que la diferencia máxima entre cualquier media

mensual y la media anual se sitúa entre 2 – 3 dB para las localizaciones B, C y D y entre 1 – 2 dB para las localizaciones A y E. Ahora bien, de la observación de la estacionalidad se puede indicar que los meses con un mayor nivel sonoro se corresponden con enero/diciembre, mientras que el mes con menor nivel sonoro se corresponden con agosto. De la misma forma, los meses cuyo nivel sonoro  $L_{DEN}$ , está más próximo a la media anual se corresponden con abril/mayo (tendencia decreciente) y octubre/noviembre (tendencia creciente). Por el contrario, para la localización E, el mes más próximo a la media anual se corresponde con los meses de junio y septiembre.

Si se analiza los datos correspondientes a los niveles  $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$  y  $L_{NIGHT}$ , los resultados en la evolución temporal son similares a los obtenidos tras el análisis de la evolución del nivel  $L_{DEN}$ , (tablas similares a la tabla 4.1 y a la tabla 4.2, y figuras similares a la figura 4.2, pero referidas a los niveles  $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$  y  $L_{NIGHT}$  se muestran en los anexos) con la diferencia de que para la localización E si se observa una estacionalidad anual en los niveles  $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$  y  $L_{NIGHT}$  (cuando no era apreciable para el nivel  $L_{DEN}$ ), si bien, no es tan clara como la observada en las otras localizaciones.

La diferencia entre el promedio mensual y el promedio anual para cada uno de los niveles  $L_{DAY}$ ,  $L_E$  y  $L_N$  contemplando todos los años viene dado por la tabla 4.3.

| <b>Localización</b>             | <b>A</b> | <b>B</b> | <b>C</b>  | <b>D</b> | <b>E</b>  |
|---------------------------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|
| <b><math>L_{DAY}</math></b>     | [1 – 2]  | [2 – 3]  | [2 – 4]   | [2 – 3]  | [2 – 3]   |
| <b><math>L_{EVENING}</math></b> | [1 – 2]  | [2 – 3]  | [3 – 3,5] | [2 – 3]  | [1 – 2,5] |
| <b><math>L_{NIGHT}</math></b>   | [1 – 2]  | [2 – 3]  | [2 – 3]   | [2 – 3]  | [1 – 3]   |

Tabla 4.3. Intervalo medio de la diferencia entre el nivel anual y el nivel mensual contemplando todos los años (en dB).

Una vez analizados los valores mensuales, procederemos a analizar la variabilidad de los datos. Para ello y teniendo en cuenta las variaciones de los niveles mes a mes, se ha

procedido a estudiar la dispersión mensual de los datos, en nuestro caso, se estudia la desviación típica de los datos en cada uno de los meses del año. De forma que se pueda distinguir si existen diferencias importantes de un mes respecto del otro.

Tras el análisis, se observa que la desviación típica, se mantiene, en general, en torno a un valor constante a lo largo de todos los meses del año (variando dentro de un pequeño rango), sin embargo, y para alguna localización puntual, la desviación típica se dispara en algún mes, observándose dos casos distintos: en el primer caso la desviación típica es un valor anormal comparando con la media de todos los meses, pero dicha desviación se observa en todos los años, como por ejemplo en los meses de enero y diciembre para la localización D en los niveles  $L_{DEN}$ ,  $L_{EVENING}$  y  $L_{NIGHT}$ , pero no tan acusado para el nivel  $L_{DAY}$ , tal y como se observa en la figura 4.2.

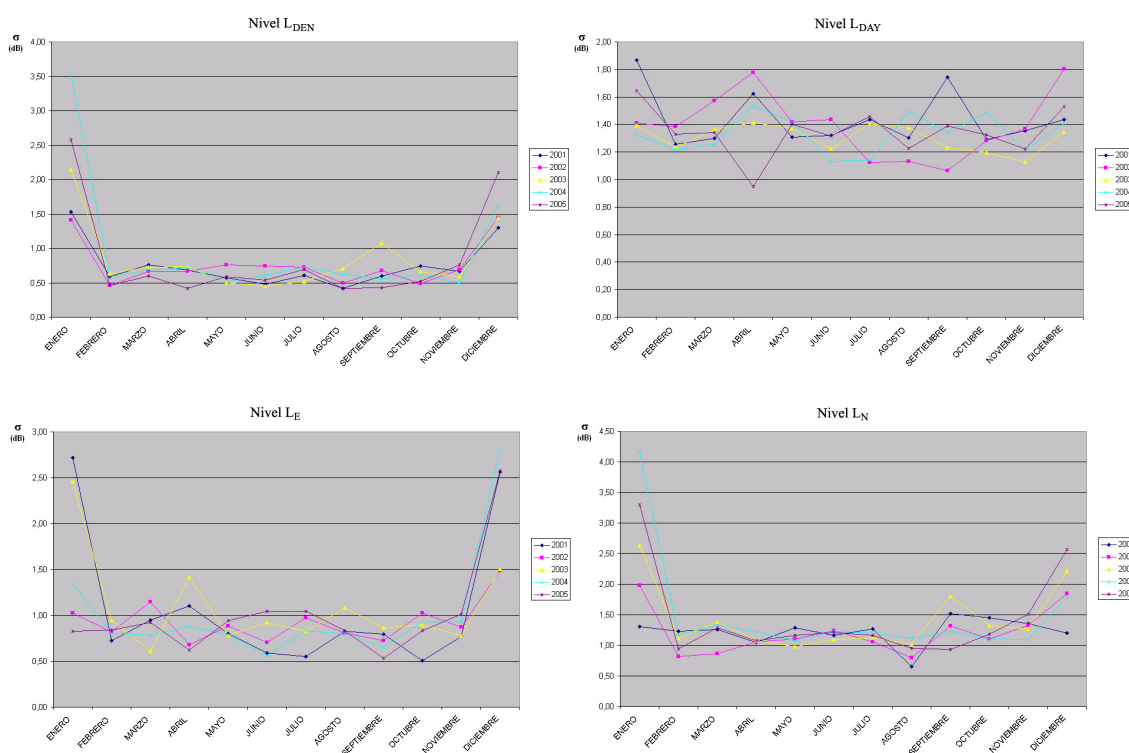


Figura 4.2. Desviación típica mensual (niveles  $L_{DEN}$ ,  $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$  y  $L_{NIGHT}$ ) en la localización D.

En el segundo caso la desviación típica es un valor anormal comparando con la media de todos los meses siendo dicha desviación ocasional comparando con el mismo mes para todos los años, como ocurre por ejemplo para el nivel  $L_{DEN}$  en la localización C. En este caso, se observa que el nivel sonoro mensual correspondiente no es un valor que siga la estacionalidad anual observada, desviándose del nivel que se podría esperar teniendo en cuenta la evolución mensual de los niveles (figura 4.3), mientras que esto no ocurre cuando el dato de la desviación típica que toma valores anómalos se repite el mismo mes todos los años, como ocurre para el nivel  $L_{DEN}$  en la localización D (figura 4.4). Se indica que esta característica encontrada en los datos de la desviación típica anómala correspondiente a la localización C son debidas a las obras en la vía pública anteriormente comentado.

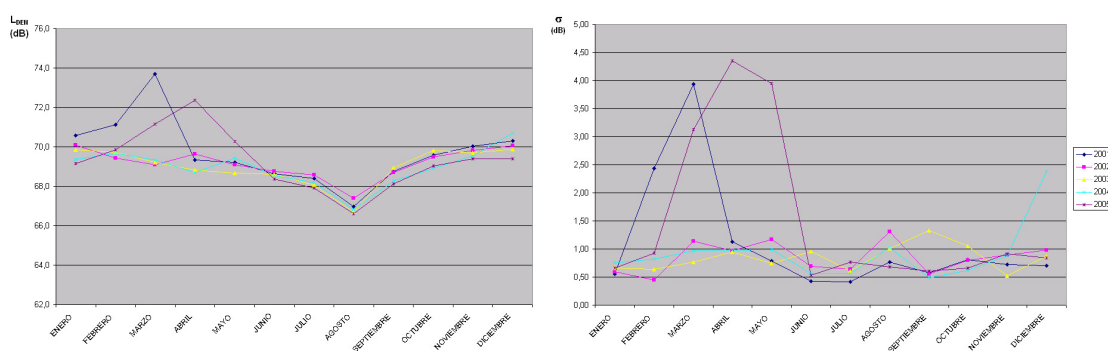


Figura 4.3. Nivel sonoro y desviación típica mensual del nivel  $L_{DEN}$  en localización C.

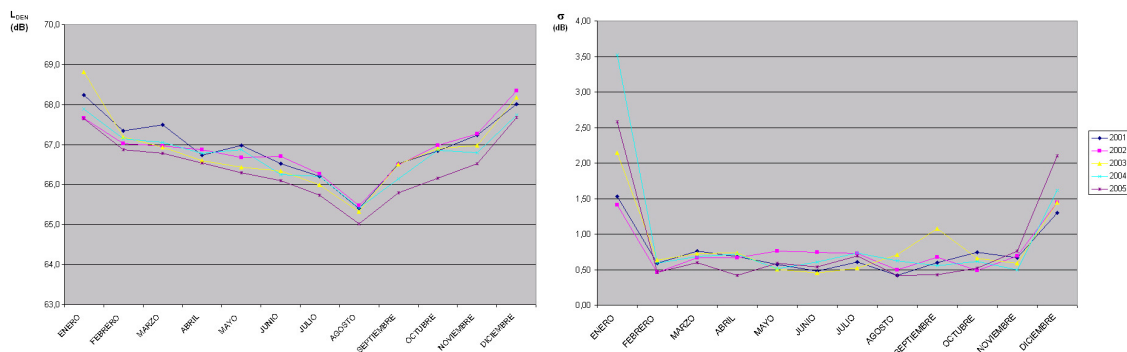


Figura 4.4. Nivel sonoro y desviación típica mensual del nivel  $L_{DEN}$  en localización D.

En la tabla 4.4 se muestran el rango de variación de la desviación típica de los datos para cada nivel y localización, y excluyendo valores anómalos, se puede indicar que para todas las localizaciones, (excluyendo localización E) la desviación típica mensual del nivel  $L_{DEN}$  está dentro de un margen común entre 0,5 y 1 dB.

De la misma forma para el nivel  $L_{DAY}$  (excluyendo localización E) la desviación típica cae en el rango [1 – 2] dB, mientras que para los niveles  $L_{EVENING}$  y  $L_{NIGHT}$  los valores de la desviación típica difieren de unas localizaciones a otras, no pudiendo establecer, aunque sea de forma aproximada, un margen de confianza común a todas ellas, si bien, en todos los casos (excluyendo localización E) la desviación típica para el nivel  $L_{EVENING}$  es inferior a 1,5 dB, y para el nivel  $L_{NIGHT}$  es inferior a 2 dB, valores que podrían usarse como referencia.

|               | <b>A</b>     | <b>B</b>    | <b>C</b>      | <b>D</b>  | <b>E</b>   |
|---------------|--------------|-------------|---------------|-----------|------------|
| $L_{DEN}$     | [0,4 – 1]    | [0,5 – 1]   | [0,5 – 1]     | [0,5 – 1] | [0,75 – 2] |
| $L_{DAY}$     | [1 – 2]      | [1,25 – 2]  | [1,75 – 2,25] | [1 – 1,5] | [1 – 2,75] |
| $L_{EVENING}$ | [0,5 – 1,5]  | [0,6 – 1,2] | [1 – 1,5]     | [0,5 – 1] | [1 – 2,5]  |
| $L_{NIGHT}$   | [0,75 – 1,5] | [1 – 2]     | [1 – 2]       | [1 – 1,5] | [1 – 2,5]  |

Tabla 4.4 Rango de la desviación típica mensual contemplando todos los años. (en dB)

### 4.3 DIFERENCIAS ENTRE EL NIVEL $L_{DEN}$ Y LOS NIVELES $L_{DAY}$ , $L_{EVENING}$ Y $L_{NIGHT}$ .

Con el objetivo de analizar cual de los tres niveles  $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$  y  $L_{NIGHT}$  sería más apropiado para estimar el nivel  $L_{DEN}$  se han calculado las diferencias diarias entre dicho nivel y cada uno de los niveles creando una nueva base de datos. A modo de ejemplo, la figura 4.5 muestra la evolución de la diferencia diaria para la localización B (para el resto de localizaciones consultar los anexos), en la que se ha superpuesto una línea de interpolación de medias móviles (media semanal) para observar mejor la tendencia. Asimismo, la tabla 4.5 muestra los estadísticos de las series de la diferencia entre niveles:  $L_{DEN} - L_{DAY}$ ,  $L_{DEN} - L_{EVENING}$ ,  $L_{DEN} - L_{NIGHT}$  para todas las localizaciones.

| Serie                   | Media | Desviación<br>Típica | Banda<br>90% | Rango<br>90% |
|-------------------------|-------|----------------------|--------------|--------------|
| Localización A          |       |                      |              |              |
| $L_{DEN} - L_{DAY}$     | 4,3   | 1,53                 | [7,0; 2,6]   | 4,4          |
| $L_{DEN} - L_{EVENING}$ | 5,1   | 0,99                 | [6,7; 3,7]   | 2,9          |
| $L_{DEN} - L_{NIGHT}$   | 7,2   | 0,61                 | [8,1; 6,3]   | 1,7          |
| Localización B          |       |                      |              |              |
| $L_{DEN} - L_{DAY}$     | 3,8   | 1,96                 | [7,3; 1,9]   | 5,4          |
| $L_{DEN} - L_{EVENING}$ | 4,4   | 1,24                 | [6,6; 2,8]   | 3,8          |
| $L_{DEN} - L_{NIGHT}$   | 7,7   | 1,01                 | [9,0; 6,3]   | 2,8          |
| Localización C          |       |                      |              |              |
| $L_{DEN} - L_{DAY}$     | 2,5   | 2,10                 | [6,1; -0,1]  | 6,2          |
| $L_{DEN} - L_{EVENING}$ | 3,8   | 1,64                 | [5,9; 2,0]   | 3,9          |
| $L_{DEN} - L_{NIGHT}$   | 8,9   | 1,95                 | [11,2; 6,7]  | 4,5          |
| Localización D          |       |                      |              |              |
| $L_{DEN} - L_{DAY}$     | 3,5   | 1,70                 | [6,2; 1,7]   | 4,5          |
| $L_{DEN} - L_{EVENING}$ | 3,7   | 1,23                 | [5,4; 2,3]   | 3,1          |
| $L_{DEN} - L_{NIGHT}$   | 8,1   | 0,93                 | [9,3; 6,7]   | 2,6          |
| Localización E          |       |                      |              |              |
| $L_{DEN} - L_{DAY}$     | 4,0   | 1,78                 | [6,7; 1,2]   | 5,6          |
| $L_{DEN} - L_{EVENING}$ | 5,1   | 1,80                 | [7,8; 2,3]   | 5,5          |
| $L_{DEN} - L_{NIGHT}$   | 7,5   | 0,97                 | [9,1; 6,4]   | 2,7          |

Tabla 4.5 Estadísticos (en dB) de la diferencia diaria entre el nivel  $L_{DEN}$  y los niveles  $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$  y  $L_{NIGHT}$  para todas las localizaciones y contemplando todos los años.



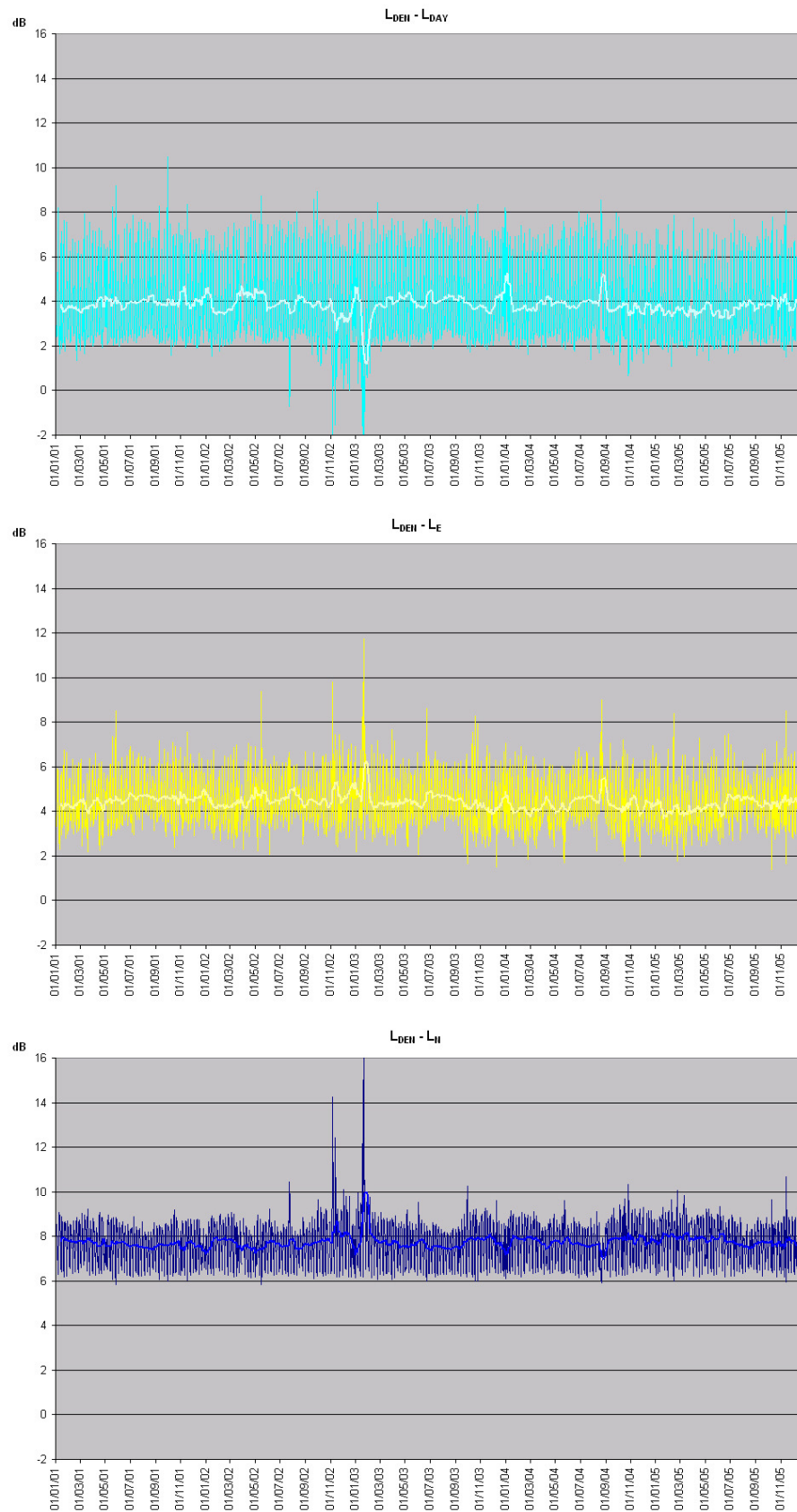


Figura 4.5. Evolución temporal diaria de la diferencia entre el nivel  $L_{DEN}$  y los niveles  $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$  y  $L_{NIGHT}$  en la localización B.

A partir de dichos resultados puede observarse como las diferencias diarias del nivel  $L_{DEN}$  respecto del nivel  $L_{DAY}$  son las que mayor dispersión registran al compararlo con las diferencias existentes respecto de los niveles  $L_{EVENING}$  y  $L_{NIGHT}$ . De la misma forma, la diferencia diaria con respecto al nivel  $L_{NIGHT}$  es la que menor dispersión presenta con la excepción de la localización C (obsérvese el dato de la desviación típica de cada una de las series en la tabla 4.5). No obstante, si se toma un período de tiempo mayor, como el que puede observarse en la línea de tendencia superpuesta en la figura 4.5, las diferencias en el promedio semanal se mantienen más o menos en torno al valor medio. Este hecho podría explicarse teniendo en cuenta las fluctuaciones que sufren los niveles diarios al llegar el fin de semana, respecto de los días laborables, que afectan más a los valores estadísticos diarios y menos al promedio semanal que ya recoge este efecto en todas las semanas. Asimismo, a partir de los datos de la tabla 4.5, puede observarse la diferencia de los valores medios entre unas localizaciones y otras (y también entre cada una de las series) si bien la diferencia máxima entre estas localizaciones puede acotarse en 1,8 dB para la diferencia  $L_{DEN} - L_{DAY}$ , en 1,4 dB para la diferencia  $L_{DEN} - L_{EVENING}$  y de 1,7 dB para la diferencia  $L_{DEN} - L_{NIGHT}$  al comparar las localizaciones (notar que de no ser por los resultados en la localización C, la diferencia en la media entre cada una de las localizaciones sería inferior para las diferencias  $L_{DEN} - L_{DAY}$  y  $L_{DEN} - L_{NIGHT}$ ).

Asimismo, cabe añadir que si se toman las diferencias en las medias mensuales las diferencias entre los niveles permanecen más o menos constante, de la misma forma que lo hace la tendencia en la media semanal, resultado que se observa más claramente en la figura 4.6 para la localización A. (consultar figuras similares en los anexos para el resto de localizaciones).

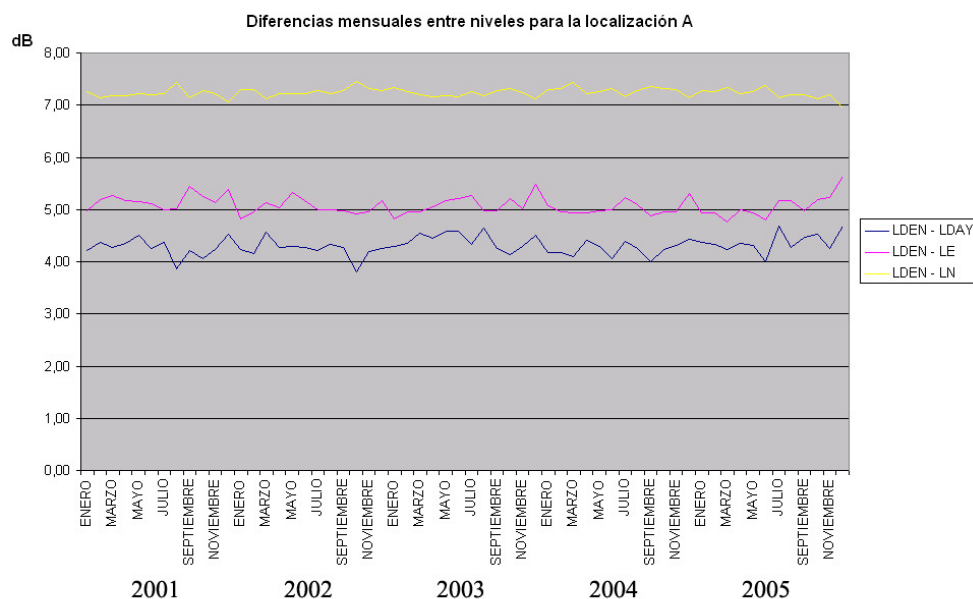


Figura 4.6. Evolución de las diferencias mensuales entre el nivel  $L_{DEN}$  y los niveles  $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$  y  $L_{NIGHT}$  para la localización A.

De la misma forma, resultados similares se obtienen si se comparan los niveles  $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$  y  $L_{NIGHT}$  entre sí; al comparar el nivel  $L_{DAY}$  con los niveles  $L_{EVENING}$  y  $L_{NIGHT}$  el promedio semanal varía muy poco en torno a un valor constante, como puede observarse en la línea de tendencia de la figura 4.7 para la localización A (para el resto de localizaciones consultar los anexos) correspondiente a la evolución diaria de las diferencias  $L_{DAY} - L_{EVENING}$  y  $L_{DAY} - L_{NIGHT}$ .

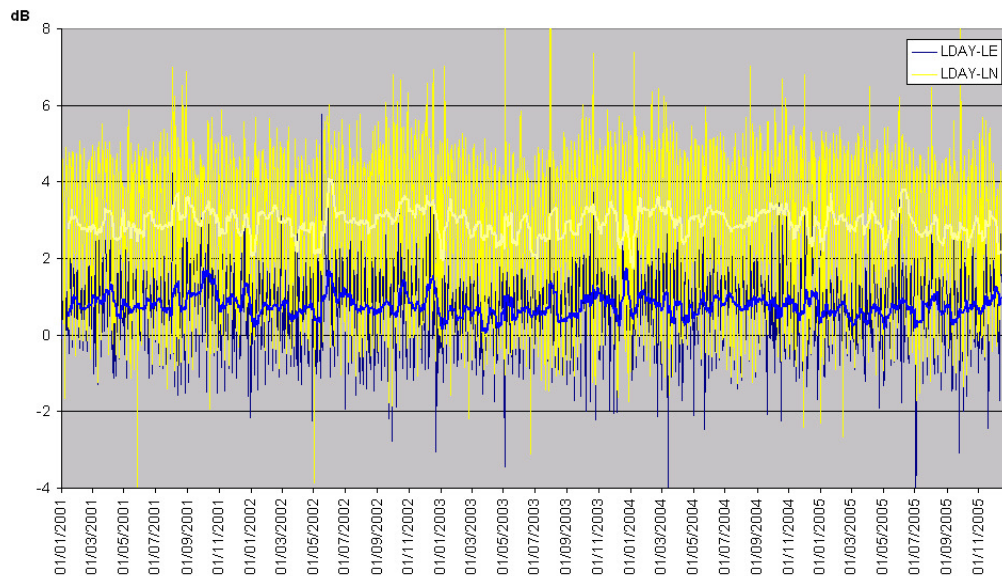


Figura 4.7. Evolución diaria de las diferencias  $L_{DAY} - L_{EVENING}$  y  $L_{DAY} - L_{NIGHT}$  en la localización A.

Sin embargo, en la localización E, y como excepción a las localizaciones afectadas por el ruido de tráfico, si se observa algún tipo de periodicidad en la diferencia de estos niveles, visualizándose mejor en los meses de junio, julio y agosto tal y como se muestra en la figura 4.8 para la diferencia  $L_{DAY} - L_{EVENING}$ .

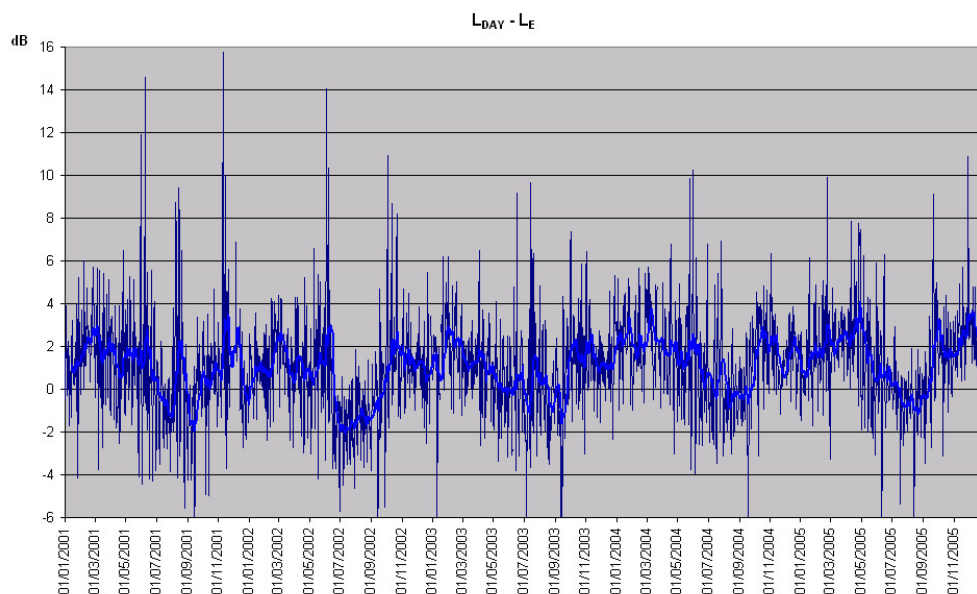


Figura 4.8. Evolución diaria de la diferencia  $L_{DAY} - L_{EVENING}$  en la localización E.

Si tomamos la evolución mensual de dichas diferencias, el rango medio de variación (para todos los años) de la media de la diferencia  $L_{DAY} - L_{EVENING}$  y de  $L_{DAY} - L_{NIGHT}$  para cada una de las estaciones se muestran en la tabla 4.6, donde se podría indicar que, salvo la excepción en la localización E, la diferencia media mensual entre el día y la tarde es inferior a 1,25 dB.

|                         | <b>A</b>    | <b>B</b>  | <b>C</b>     | <b>D</b>      | <b>E</b>   |
|-------------------------|-------------|-----------|--------------|---------------|------------|
| $L_{DAY} - L_{EVENING}$ | [0,5 – 1]   | [0 – 1]   | [0,5 – 1,25] | [-0,5 – 0,75] | [-1 – 2,5] |
| $L_{DAY} - L_{NIGHT}$   | [2,5 – 3,5] | [3 – 4,5] | [5 – 6,5]    | [3,5 – 5]     | [3,5 – 5]  |

Tabla 4.6. Rango de variación mensual (en dB) de las diferencias  $L_{DAY} - L_{EVENING}$  y  $L_{DAY} - L_{NIGHT}$  para cada una de las estaciones contemplando todos los años.

Para la diferencia entre el día y la noche si bien el margen de variación es distinto para cada una de las localizaciones (por ejemplo entre la localización E está entre 3,5 y 5 dB y para la localización C está entre 5 y 6,5 dB), el margen entre el mínimo valor de la diferencia y el máximo está alrededor de 1,5 dB. Para la localización E, donde se puede observar la existencia de dos periodos de comportamiento distinto, tomando cada uno de ellos separadamente la diferencia entre la máxima diferencia y la mínima, también oscila alrededor de los 1,5 dB de margen.

#### 4.4 INFLUENCIA DE LOS FINES DE SEMANA Y FESTIVOS EN MEDIDAS DE LARGA DURACIÓN.

Una vez realizada la evaluación previa se ha creído conveniente realizar una comparativa de estos resultados con los que se obtendrían al excluir de la base de datos original los días que coinciden con fines de semana y festivos de forma que en este caso se analice la desviación de los datos y las diferencias que se presentan respecto de tomar todos los días, pensando en que cuando se procede a una medición de tipo diario, es más frecuente tomar dicha medición en un día laborable, que no en el caso contrario, de manera que del análisis de los resultados se pueda observar si presentan diferencias significativas.

| Localización | Año 2001 | Año 2002 | Año 2003 | Año 2004 | Año 2005 |
|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>A</b>     | 74,20    | 74,08    | 73,99    | 73,84    | 73,81    |
| <b>B</b>     | 76,02    | 75,67    | 75,85    | 74,88    | 73,95    |
| <b>C</b>     | 69,88    | 69,26    | 69,05    | 68,95    | 69,60    |
| <b>D</b>     | 66,82    | 66,87    | 66,71    | 66,65    | 66,24    |
| <b>E</b>     | 56,21    | 55,78    | 55,89    | 55,96    | 55,75    |

Tabla 4.7. Valor promedio anual  $L_{DEN}$  (en dB) correspondiente a días laborables.

En la tabla 4.7 se muestra el promedio anual del nivel  $L_{DEN}$  correspondiente a los días laborables en las distintas localizaciones y comparándolos con la tabla 4.1 se puede indicar que los valores medios anuales apenas han sufrido variación, siendo dicha diferencia despreciable. No obstante, para los promedios anuales de días laborables correspondientes a los niveles  $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$  y  $L_{NIGHT}$  si que se observan diferencias: para el nivel  $L_{DAY}$  el nivel promedio anual de los días laborables es superior al nivel promedio anual tomando todos los días (en torno a 1 dB como límite superior); lo mismo ocurre para el nivel  $L_{EVENING}$ , siendo el promedio anual de los días laborables

superior en torno a 0,5 dB, mientras que para el nivel  $L_{\text{NIGHT}}$  el nivel promedio anual de los días laborables es inferior, en torno a 1 dB, (fundamentalmente debido a menor actividad nocturna en días laborables) al nivel promedio tomando todos los días. Resultado que puede observarse más claramente a partir de los datos mostrados en la tabla 4.8 para cada año. No obstante la localización E, cumple la excepción (como en otras consideraciones anteriores).

| Año                   | Nivel $L_{\text{DAY}}$ |            | Nivel $L_{\text{EVENING}}$ |            | Nivel $L_{\text{NIGHT}}$ |            |
|-----------------------|------------------------|------------|----------------------------|------------|--------------------------|------------|
|                       | Todos                  | Laborables | Todos                      | Laborables | Todos                    | Laborables |
| <b>Localización A</b> |                        |            |                            |            |                          |            |
| 2001                  | 70,2                   | 70,8       | 69,3                       | 69,4       | 67,2                     | 66,7       |
| 2002                  | 70,0                   | 70,8       | 69,2                       | 69,4       | 67,0                     | 66,5       |
| 2003                  | 69,8                   | 70,5       | 69,1                       | 69,4       | 67,0                     | 66,4       |
| 2004                  | 69,8                   | 70,5       | 69,0                       | 69,2       | 66,7                     | 66,2       |
| 2005                  | 69,6                   | 70,3       | 68,9                       | 69,2       | 66,8                     | 66,3       |
| <b>Localización B</b> |                        |            |                            |            |                          |            |
| 2001                  | 72,4                   | 73,3       | 71,8                       | 72,2       | 68,7                     | 67,8       |
| 2002                  | 72,1                   | 73,1       | 71,4                       | 71,7       | 68,2                     | 67,4       |
| 2003                  | 72,2                   | 73,2       | 71,6                       | 72,0       | 68,3                     | 67,5       |
| 2004                  | 71,2                   | 72,2       | 70,8                       | 71,2       | 67,3                     | 66,6       |
| 2005                  | 70,4                   | 71,4       | 69,8                       | 70,3       | 66,3                     | 65,6       |
| <b>Localización C</b> |                        |            |                            |            |                          |            |
| 2001                  | 67,4                   | 68,8       | 65,5                       | 66,0       | 60,6                     | 59,8       |
| 2002                  | 66,4                   | 67,7       | 65,6                       | 66,2       | 60,5                     | 59,8       |
| 2003                  | 66,3                   | 67,5       | 65,4                       | 65,9       | 60,2                     | 59,5       |
| 2004                  | 66,2                   | 67,3       | 65,4                       | 65,9       | 60,3                     | 59,6       |
| 2005                  | 67,1                   | 68,6       | 65,2                       | 65,7       | 59,8                     | 59,2       |
| <b>Localización D</b> |                        |            |                            |            |                          |            |
| 2001                  | 63,4                   | 64,2       | 62,9                       | 63,2       | 59,1                     | 58,4       |
| 2002                  | 63,5                   | 64,3       | 63,1                       | 63,4       | 58,8                     | 58,4       |
| 2003                  | 63,4                   | 64,1       | 63,2                       | 63,5       | 58,7                     | 58,1       |
| 2004                  | 63,3                   | 64,1       | 63,2                       | 63,5       | 58,6                     | 58,0       |
| 2005                  | 62,9                   | 63,7       | 62,7                       | 63,0       | 58,3                     | 57,6       |
| <b>Localización E</b> |                        |            |                            |            |                          |            |
| 2001                  | 52,6                   | 52,7       | 51,6                       | 51,2       | 48,9                     | 48,4       |
| 2002                  | 52,0                   | 52,0       | 51,4                       | 50,9       | 48,6                     | 48,2       |
| 2003                  | 52,0                   | 52,0       | 51,0                       | 50,6       | 48,8                     | 48,5       |
| 2004                  | 52,2                   | 52,3       | 50,7                       | 50,5       | 48,7                     | 48,5       |
| 2005                  | 52,0                   | 52,1       | 50,6                       | 50,3       | 48,6                     | 48,3       |

Tabla 4.8. Valor promedio anual de los días laborables y de todos los días para los niveles  $L_{\text{DAY}}$ ,  $L_{\text{EVENING}}$  y  $L_{\text{NIGHT}}$  (en dB) en cada localización.

Asimismo, contemplando promedios mensuales el margen de la diferencia entre el promedio de todos los días y el de los días laborables, contemplando todos los meses del año, viene mostrado a partir de los datos de la tabla 4.9.

| Localización                          | Año 2001       | Año 2002       | Año 2003       | Año 2004       | Año 2005       |
|---------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>Nivel <math>L_{DEN}</math></b>     |                |                |                |                |                |
| <b>A</b>                              | [0,07; 0,44]   | [0,02; 0,29]   | [0,05; 0,39]   | [0,03; 0,34]   | [0,01; 0,30]   |
| <b>B</b>                              | [0,05; 0,44]   | [0,09; 0,38]   | [-0,05; 0,48]  | [0,00; 0,43]   | [-0,11; 0,40]  |
| <b>C</b>                              | [-0,27; 0,14]  | [-0,25; 0,11]  | [-0,31; 0,26]  | [-0,27; 0,36]  | [-0,37; 0,17]  |
| <b>D</b>                              | [-0,06; 0,31]  | [-0,14; 0,27]  | [-0,05; 0,45]  | [-0,03; 0,22]  | [-0,03; 0,24]  |
| <b>E</b>                              | [-0,06; 0,66]  | [-0,01; 0,92]  | [-0,13; 0,76]  | [-0,10; 0,48]  | [0,01; 0,54]   |
| <b>Nivel <math>L_{DAY}</math></b>     |                |                |                |                |                |
| <b>A</b>                              | [-0,47; -1,03] | [-0,51; -0,98] | [-0,48; -1,10] | [-0,47; -1,04] | [-0,49; -1,02] |
| <b>B</b>                              | [-0,74; -1,27] | [-0,66; -1,37] | [-0,67; -1,22] | [-0,76; -1,24] | [-0,41; -1,44] |
| <b>C</b>                              | [-0,75; -1,74] | [-0,94; -1,57] | [-0,95; -1,46] | [-0,89; -1,47] | [-0,91; -1,61] |
| <b>D</b>                              | [-0,45; -0,98] | [-0,58; -1,13] | [-0,64; -0,90] | [-0,61; -0,95] | [-0,50; -1,04] |
| <b>E</b>                              | [0,67; -0,77]  | [0,61; -0,73]  | [0,67; -0,52]  | [0,33; -0,81]  | [0,37; -0,43]  |
| <b>Nivel <math>L_{EVENING}</math></b> |                |                |                |                |                |
| <b>A</b>                              | [-0,34; 0,14]  | [-0,43; -0,07] | [-0,51; 0,02]  | [-0,44; -0,11] | [-0,36; -0,08] |
| <b>B</b>                              | [-0,65; -0,14] | [-0,68; -0,19] | [-0,56; -0,21] | [-0,67; -0,30] | [-0,69; -0,25] |
| <b>C</b>                              | [-0,74; -0,46] | [-0,79; -0,40] | [-0,67; -0,25] | [-0,65; -0,27] | [-0,82; -0,12] |
| <b>D</b>                              | [-0,53; -0,12] | [-0,47; -0,05] | [-0,42; -0,05] | [-0,47; -0,14] | [-0,38; -0,14] |
| <b>E</b>                              | [-0,28; 1,23]  | [-0,32; 1,23]  | [-0,61; 1,55]  | [-0,25; 0,98]  | [-0,34; 1,25]  |
| <b>Nivel <math>L_{NIGHT}</math></b>   |                |                |                |                |                |
| <b>A</b>                              | [0,44; 0,79]   | [0,31; 0,65]   | [0,37; 0,80]   | [0,41; 0,73]   | [0,29; 0,66]   |
| <b>B</b>                              | [0,44; 1,02]   | [0,55; 1,08]   | [0,54; 1,16]   | [0,40; 1,11]   | [0,31; 1,06]   |
| <b>C</b>                              | [0,27; 1,09]   | [0,17; 1,00]   | [0,31; 1,30]   | [0,27; 1,10]   | [0,29; 0,97]   |
| <b>D</b>                              | [0,23; 0,92]   | [0,18; 0,71]   | [0,33; 1,09]   | [0,32; 1,35]   | [0,37; 1,40]   |
| <b>E</b>                              | [0,01; 0,82]   | [0,13; 0,86]   | [-0,08; 0,74]  | [0,02; 0,60]   | [-0,20; 0,78]  |

Tabla 4.9. Margen de la diferencia en el promedio mensual (en dB), a lo largo del año, entre el nivel de todos los días y el nivel correspondiente a los días laborables.

No obstante los resultados más interesantes al considerar, solamente, los promedios correspondientes a los días laborables se obtienen al analizar la dispersión (cuantificado a través de la desviación típica mensual) que presentan los datos. Teniendo en cuenta el nivel  $L_{DEN}$ , los datos presentan, en resultados numéricos, una dispersión similar a la encontrada para los resultados contemplando todos los días, si bien para aquellos meses



donde encontrábamos un valor anómalo para la desviación típica mensual, ahora, dicha desviación es menor y más próxima a la media del resto de meses. Para los meses que no presentan un dato anómalo, los valores de la desviación típica son similares, si bien ligeramente inferiores, lo que implica una menor dispersión (ligeramente) de los datos. Sin embargo para los niveles  $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$  y  $L_{NIGHT}$ , la desviación típica mensual correspondientes a los días laborables es inferior a la observada tomando todos los días, siendo la reducción mayor para el nivel  $L_{DAY}$  que para los otros niveles, donde la disminución es menos acusada. En la tabla 4.10 se muestra la diferencia media entre las desviaciones típicas mensuales y su rango de variación contemplando todos los años en cada una de las localizaciones.

|                                 | <b>A</b>            | <b>B</b>            | <b>C</b>            | <b>D</b>            | <b>E</b>             |
|---------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| <b><math>L_{DEN}</math></b>     | 0,08<br>[0,3; -0,3] | 0,08<br>[0,3; -0,3] | 0,05<br>[0,3; -0,3] | 0,07<br>[0,6; -0,3] | 0,06<br>[0,8; -0,4]  |
| <b><math>L_{DAY}</math></b>     | 0,70<br>[1,1; 0,3]  | 1<br>[1,4; 0,5]     | 1,2<br>[1,7; 0,4]   | 0,75<br>[1,1; 0,4]  | -0,03<br>[0,3; -0,4] |
| <b><math>L_{EVENING}</math></b> | 0,14<br>[0,5; -0,1] | 0,27<br>[0,6; 0,0]  | 0,35<br>[0,6; 0,1]  | 0,11<br>[0,5; -0,1] | 0,2<br>[0,8; -0,3]   |
| <b><math>L_{NIGHT}</math></b>   | 0,3<br>[0,6; 0,0]   | 0,48<br>[0,8; 0,3]  | 0,38<br>[0,9; -0,1] | 0,36<br>[0,9; -0,1] | 0,09<br>[0,8; -0,4]  |

Tabla 4.10. Diferencia en el valor medio y rango de variación (en dB) para la desviación típica correspondiente a tomar los días laborables respecto de tomar todos los días. (para el 95% datos).

Resultado que se puede observar más claramente a partir de los datos mes a mes, como el que se muestra en la tabla 4.11 para la localización D en el año 2002. (para el resto de años y localizaciones consultar los anexos).

|                   | TODOS LOS DÍAS   |                  |                      |                    | DÍAS LABORABLES  |                  |                      |                    |
|-------------------|------------------|------------------|----------------------|--------------------|------------------|------------------|----------------------|--------------------|
|                   | L <sub>DEN</sub> | L <sub>DAY</sub> | L <sub>EVENING</sub> | L <sub>NIGHT</sub> | L <sub>DEN</sub> | L <sub>DAY</sub> | L <sub>EVENING</sub> | L <sub>NIGHT</sub> |
| <b>ENERO</b>      | 1,41             | 1,41             | 1,03                 | 1,98               | 0,49             | 0,54             | 0,67                 | 0,66               |
| <b>FEBRERO</b>    | 0,46             | 1,38             | 0,82                 | 0,81               | 0,48             | 0,56             | 0,79                 | 0,68               |
| <b>MARZO</b>      | 0,67             | 1,57             | 1,15                 | 0,87               | 0,63             | 0,66             | 0,76                 | 0,89               |
| <b>ABRIL</b>      | 0,66             | 1,78             | 0,68                 | 1,06               | 0,66             | 1,24             | 0,61                 | 0,91               |
| <b>MAYO</b>       | 0,76             | 1,42             | 0,88                 | 1,11               | 0,82             | 0,62             | 0,80                 | 1,24               |
| <b>JUNIO</b>      | 0,74             | 1,44             | 0,71                 | 1,24               | 0,64             | 0,68             | 0,57                 | 0,98               |
| <b>JULIO</b>      | 0,72             | 1,13             | 0,97                 | 1,06               | 0,79             | 0,45             | 0,97                 | 1,14               |
| <b>AGOSTO</b>     | 0,49             | 1,13             | 0,81                 | 0,79               | 0,46             | 0,39             | 0,83                 | 0,62               |
| <b>SEPTIEMBRE</b> | 0,67             | 1,07             | 0,72                 | 1,32               | 0,73             | 0,38             | 0,72                 | 1,30               |
| <b>OCTUBRE</b>    | 0,49             | 1,28             | 1,02                 | 1,11               | 0,50             | 0,55             | 0,81                 | 0,87               |
| <b>NOVIEMBRE</b>  | 0,69             | 1,37             | 0,87                 | 1,33               | 0,57             | 0,69             | 0,67                 | 0,89               |
| <b>DICIEMBRE</b>  | 1,44             | 1,80             | 1,49                 | 1,85               | 0,99             | 0,81             | 1,43                 | 1,10               |

Tabla 4.11. Desviaciones típicas mensuales de los niveles  $L_{DEN}$ ,  $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$  y  $L_{NIGHT}$  para la localización D correspondientes al año 2002.

Si nos centramos en las series de las diferencias  $L_{DEN} - L_{DAY}$ ,  $L_{DEN} - L_{EVENING}$  y  $L_{DEN} - L_{NIGHT}$  tomando exclusivamente los días laborables, se observa que la media anual (de la diferencia) no es la misma al comparar entre localizaciones (de la misma forma que tomando todos los datos: consultar tabla 4.5) como puede observarse a partir de los datos mostrados en la tabla 4.12. Asimismo, al comparar estos resultados con la tabla 4.5, puede observarse que los valores son distintos, siendo las diferencias menores para las series correspondientes a los días laborables  $L_{DEN} - L_{DAY}$  y  $L_{DEN} - L_{EVENING}$  y mayores para la diferencia  $L_{DEN} - L_{NIGHT}$ . No obstante, cabe indicar que estos valores mensuales no se mantienen en el mismo rango para todos los meses, si bien, este margen es pequeño, en torno a  $\pm 0,5$  dB respecto de la media anual, y podría considerarse, a efectos prácticos, no significativo.

|          | 2001             | 2002            | 2003            | 2004            | 2005             |
|----------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| <b>A</b> | 3,4 / 4,8 / 7,5  | 3,3 / 4,6 / 7,6 | 3,5 / 4,6 / 7,6 | 3,3 / 4,6 / 7,6 | 3,5 / 4,7 / 7,5  |
| <b>B</b> | 2,7 / 3,9 / 8,2  | 2,6 / 3,9 / 8,3 | 2,6 / 3,8 / 8,4 | 2,7 / 3,7 / 8,3 | 2,6 / 3,7 / 8,3  |
| <b>C</b> | 1,1 / 3,9 / 10,1 | 1,6 / 3,1 / 9,5 | 1,5 / 3,1 / 9,5 | 1,6 / 3,1 / 9,4 | 1,0 / 3,9 / 10,4 |
| <b>D</b> | 2,6 / 3,6 / 8,4  | 2,6 / 3,5 / 8,4 | 2,6 / 3,2 / 8,6 | 2,6 / 3,1 / 8,7 | 2,5 / 3,2 / 8,6  |
| <b>E</b> | 3,5 / 5,0 / 7,7  | 3,8 / 4,9 / 7,6 | 3,9 / 5,3 / 7,4 | 3,7 / 5,5 / 7,5 | 3,6 / 5,5 / 7,4  |

Tabla 4.12. Medias anuales (en dB) para cada una de las series  $L_{DEN} - L_{DAY}$  /  $L_{DEN} - L_{EVENING}$  /  $L_{DEN} - L_{NIGHT}$

Esta menor variación se contempla mejor analizando los resultados de la desviación típica. Al calcular la desviación típica mensual de las series anteriores nos encontramos con una clara generalización de que para todas las estaciones la desviación típica mensual es muy similar, tomando valores bajos (inferiores a 1 dB), distribuyéndose de forma aleatoria en torno al valor medio anual. En general la serie  $L_{DEN} - L_{NIGHT}$  presenta una mejor dispersión (levemente) comparando con las otras dos series y contiene menor cantidad de valores de la desviación típica mensual lejos de la media anual (menos anómalos) y por lo tanto, más estable.

La desviación típica mensual de las series  $L_{DEN} - L_{DAY}$  y  $L_{DEN} - L_{EVENING}$  para todas las estaciones se encuentra en una banda de  $\pm 0,4/0,5$  dB respecto al valor medio anual, mientras que para la series  $L_{DEN} - L_{NIGHT}$  ese margen se reduce a  $\pm 0,2$  dB, salvo para la localización C, donde ese margen se amplía a  $\pm 0,3$  dB. En la tabla 4.13 puede observarse la desviación típica anual para cada una de las localizaciones y cada una de las series, resultados que pueden compararse con los obtenidos en la tabla 4.5 para todos los días.

|          | 2001               | 2002               | 2003               | 2004               | 2005               |
|----------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| <b>A</b> | 0,55 / 0,67 / 0,33 | 0,6 / 0,70 / 0,36  | 0,72 / 0,83 / 0,44 | 0,64 / 0,73 / 0,43 | 0,6 / 0,57 / 0,33  |
| <b>B</b> | 0,51 / 0,64 / 0,45 | 0,82 / 0,85 / 0,66 | 0,75 / 0,86 / 0,68 | 0,68 / 0,77 / 0,56 | 0,56 / 0,73 / 0,54 |
| <b>C</b> | 0,69 / 1,21 / 1,21 | 0,7 / 0,90 / 0,86  | 0,75 / 0,82 / 0,85 | 0,63 / 0,77 / 0,73 | 0,86 / 1,47 / 1,56 |
| <b>D</b> | 0,77 / 0,7 / 0,6   | 0,6 / 0,67 / 0,51  | 0,66 / 0,77 / 0,61 | 0,64 / 0,7 / 0,52  | 0,62 / 0,65 / 0,49 |
| <b>E</b> | 1,60 / 1,53 / 1,11 | 1,38 / 1,39 / 0,89 | 1,56 / 1,79 / 0,88 | 1,5 / 1,61 / 0,77  | 1,14 / 1,43 / 0,69 |

Tabla 4.13. Valor medio para las desviaciones típicas mensuales (dB) correspondientes a las series  $L_{DEN} - L_{DAY}$  /  $L_{DEN} - L_{EVENING}$  /  $L_{DEN} - L_{NIGHT}$ .



## **5. TÉCNICAS DE ESTIMACIÓN Y PREDICCIÓN DE LOS NIVELES SONOROS $L_{DEN}$ , $L_{DAY}$ , $L_{EVENING}$ Y $L_{NIGHT}$ .**

### **5.1 METODOLOGÍA BASADA EN EL MUESTREO**

#### 5.1.1 INTRODUCCIÓN

En el apartado anterior ya se comentó que para la determinación de los niveles de ruido ambientales la directiva Europea [1] establece la posibilidad de realizar simulaciones y/o mediciones. En el primer caso, con la ayuda de aplicaciones informáticas y en función de parámetros como ubicación, tráfico, fuentes de ruido y otros parámetros se obtienen los valores de esos niveles que, en algunos casos son contrastados con mediciones de corta duración con la finalidad de obtener una mayor precisión en el modelo. En el segundo caso, se realiza la medición in situ, estableciendo tiempos de medida de mayor o menor duración e indicando que son representativas de períodos de tiempo mayores, pero sin establecer el margen de error que se ha cometido en dicha estimación.

En cualquiera de los dos casos, y debido a la variabilidad presente en los datos, van a existir errores de imprecisión. Dichos errores dependerán del tiempo de muestreo en función del período de tiempo representativo de la medida [24, 25]. En referencias [16], [19] y [21], se determina el error cometido en la estimación del nivel  $L_{Aeq}$  para períodos de larga duración (años) a partir de medidas y estrategias de varios días, teniendo en cuenta la variabilidad del nivel  $L_{Aeq}$  a lo largo del año. Para estimaciones de menor duración, tendríamos desde la estimación de una o varias semanas a partir de la medición de uno o pocos días [26 – 28], hasta la estimación del nivel diario a partir de mediciones de pocas horas dentro de la franja horaria, contemplando en este último caso la variabilidad de los niveles en función de la franja horaria [23, 29, 30].

Atendiendo a estas consideraciones, en la referencia [28] se establece una diferencia de  $\pm 2$  dB en los niveles percentiles al tomar un día u otro de medida y un rango de 2 dB para medidas tomadas a distinta hora del día en la franja diurna. Por último, y con el objetivo de obtener la representatividad de la medida, otros estudios [3, 10, 15, 31, 32] reflejan una menor variabilidad para la franja diurna con respecto a una mayor variabilidad observada en la franja nocturna.

En cualquier caso, en estas referencias sólo se han tenido en cuenta las mediciones para los períodos de tiempo evaluados, (en la mayoría de las referencias correspondientes a períodos de corta duración), con independencia de los de mayor duración (estimaciones de niveles anuales), sin relacionarse las imprecisiones que se cometían al estimar mediciones de corta y de larga duración, de forma que se pudiera extrapolar la variabilidad del corto al largo plazo. Es por ello que uno de los propósitos de este apartado es establecer los márgenes de error en las predicciones cuando se toman períodos de tiempo más cortos, pasando desde la estimación de períodos de larga duración, hasta los períodos de media y corta duración, de forma que se pueda establecer un marco de referencia del error cometido en función del tiempo de muestreo tomado.

De la misma forma que se contempló en el apartado anterior, el estudio se abordará para cada una de las franjas horarias: período DAY (7:00 – 19:00 h), período EVENING (19:00 – 23:00 h) y el período NIGHT (23:00 – 7:00 h)). Asimismo, también se distinguirá entre tomar estimaciones en días laborables con respecto a las estimaciones contemplando todos los días.

### 5.1.2 ESTIMACIÓN DE LOS NIVELES ANUALES (LARGA DURACIÓN)

En la referencia [16] se analizaba la estimación del nivel equivalente anual  $L_{Aeq,T}$  en base a diferentes estrategias de medición de menor duración de forma que se obtenía el error cometido en dicha estrategia respecto del nivel anual. En virtud del mismo desarrollo se ha pretendido comparar dichos errores con los que se corresponderían al evaluar los niveles anuales de los parámetros  $L_{DEN}$ ,  $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$  y  $L_{NIGHT}$  de forma independiente, de forma que se pueda comparar si se sigue, o no, el mismo comportamiento en la distribución de errores que la correspondiente al nivel equivalente  $L_{Aeq,T}$  para cada uno de los puntos de medición.

En dicho análisis sólo se tomaron las estrategias correspondientes a tomar la medición de días continuos y tomar días aleatorios, de forma que para cada año de medición se tomaron muestras desde 1 hasta 14 días de medición en continuo e inicio aleatorio y muestras desde 1 día hasta 14 días aleatorios, calculándose, para cada muestra, el nivel medio de la muestra y comparándolo con el nivel anual del año donde era extraída la muestra, de forma que el resultado final era la distribución del error cometido al emplear cada una de las estrategias. La metodología seguida para la evaluación del error cometido en cada una de las estrategias de medición es como sigue:

- Cada una de las estrategias es considerada de forma independiente del resto, tomando 100 muestras aleatorias por año para cada una de las estrategias (y para cada uno de los niveles sonoros  $L_{DEN}$ ,  $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$  y  $L_{NIGHT}$ ), que contabilizando un total de 5 años dan una cantidad total de 500 muestras por nivel sonoro. Para cada una de las muestras tomadas, es calculada la media del nivel sonoro correspondiente al periodo de cada estrategia y comparada con el correspondiente nivel promedio anual



correspondiente al año de extracción de la muestra. Por ejemplo, supongamos que elegimos el nivel sonoro  $L_{DAY}$  y una estrategia de medición de 5 días aleatorios. Se toman entonces 100 muestras de 5 días aleatorios por año, y para cada una de estas muestras se calcula la media del nivel sonoro  $L_{DAY}$  correspondiente a esos cinco días (a partir del nivel sonoro diario  $L_{DAY}$  de cada día aleatorio). Este valor es comparado con el nivel sonoro anual  $L_{DAY}$  del año en el cual la muestra fue extraída. El valor de estas diferencias es el dato que se utiliza para analizar la idoneidad o no de una estrategia frente a otra al comparar entre las distintas estrategias utilizadas.

Las tablas 5.1.1 y 5.1.2 resumen los estadísticos del error cometido en cada una de las estrategias de medición utilizadas correspondientes a cada uno de los niveles  $L_{DEN}$ ,  $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$  y  $L_{NIGHT}$  en la localización A. De la misma forma, en las tablas 5.1.3 y 5.1.4 se ilustra la banda de probabilidad del error  $\pm 1$  dB para el resto de localizaciones.

| <b>Días</b> | <b>Media</b>  |                | <b>Desviación<br/>Típica</b> |                | <b>Probabilidad<br/>[-1 ; +1]</b> |                | <b>Banda 90%</b> |                |
|-------------|---------------|----------------|------------------------------|----------------|-----------------------------------|----------------|------------------|----------------|
|             | Días<br>Cont. | Días<br>Aleat. | Días<br>Cont.                | Días<br>Aleat. | Días<br>Cont.                     | Días<br>Aleat. | Días<br>Cont.    | Días<br>Aleat. |
| <b>1</b>    |               | 0,00           |                              | 1,06           |                                   | 70,5%          |                  | [-1,5; 1,7]    |
| <b>2</b>    | -0,01         | 0,02           | 0,88                         | 0,74           | 72,1%                             | 85,9%          | [-1,4; 1,4]      | [-1,1; 1,3]    |
| <b>3</b>    | -0,06         | -0,04          | 0,84                         | 0,58           | 77,8%                             | 91,5%          | [-1,5; 1,3]      | [-1,0; 0,8]    |
| <b>4</b>    | 0,02          | 0,02           | 0,82                         | 0,49           | 77,3%                             | 94,8%          | [-1,4; 1,3]      | [-0,8; 0,9]    |
| <b>5</b>    | 0,00          | -0,01          | 0,79                         | 0,43           | 78,1%                             | 98,0%          | [-1,3; 1,2]      | [-0,7; 0,7]    |
| <b>6</b>    | 0,05          | -0,01          | 0,77                         | 0,40           | 80,7%                             | 98,6%          | [-1,3; 1,2]      | [-0,7; 0,6]    |
| <b>7</b>    | 0,05          | 0,01           | 0,71                         | 0,37           | 84,8%                             | 99,5%          | [-1,1; 1,1]      | [-0,6; 0,6]    |
| <b>8</b>    | -0,01         | 0,00           | 0,72                         | 0,33           | 86,1%                             | 100%           | [-1,2; 1,0]      | [-0,6; 0,6]    |
| <b>9</b>    | 0,06          | -0,02          | 0,73                         | 0,33           | 82,5%                             | 100%           | [-1,2; 1,2]      | [-0,6; 0,5]    |
| <b>10</b>   | 0,04          | 0,00           | 0,67                         | 0,31           | 87,1%                             | 100%           | [-1,0; 1,1]      | [-0,5; 0,5]    |
| <b>11</b>   | 0,07          | 0,00           | 0,68                         | 0,29           | 85,6%                             | 100%           | [-1,1; 1,1]      | [-0,4; 0,5]    |
| <b>12</b>   | 0,04          | 0,00           | 0,67                         | 0,29           | 88,6%                             | 100%           | [-1,1; 1,0]      | [-0,5; 0,5]    |
| <b>13</b>   | 0,09          | -0,02          | 0,66                         | 0,26           | 88,0%                             | 100%           | [-1,0; 1,0]      | [-0,4; 0,4]    |
| <b>14</b>   | 0,04          | 0,01           | 0,64                         | 0,25           | 89,6%                             | 100%           | [-1,0; 1,0]      | [-0,4; 0,4]    |

Tabla 5.1.1. Estadísticos del error cometido en la estimación del nivel anual  $L_{DEN}$  (en dB) al tomar estrategias de medición de días continuos y aleatorios correspondientes en la localización A.

|                            | Media            |                |                | Desviación<br>Típica |                |                | Probabilidad<br>[-1 ; +1] |                |                | Banda 90%        |                |                |
|----------------------------|------------------|----------------|----------------|----------------------|----------------|----------------|---------------------------|----------------|----------------|------------------|----------------|----------------|
| Estrategia Días Continuos  |                  |                |                |                      |                |                |                           |                |                |                  |                |                |
| Días                       | L <sub>DAY</sub> | L <sub>E</sub> | L <sub>N</sub> | L <sub>DAY</sub>     | L <sub>E</sub> | L <sub>N</sub> | L <sub>DAY</sub>          | L <sub>E</sub> | L <sub>N</sub> | L <sub>DAY</sub> | L <sub>E</sub> | L <sub>N</sub> |
| 1                          | -0,11            | 0,03           | 0,06           | 1,50                 | 1,16           | 1,42           | 49%                       | 66%            | 54%            | [-3,0; 1,9]      | [-1,8; 1,7]    | [-1,9; 2,4]    |
| 2                          | -0,04            | -0,03          | 0,05           | 1,20                 | 0,98           | 1,18           | 62%                       | 71%            | 59%            | [-2,2;1,7]       | [-1,6;1,6]     | [-1,8;2,1]     |
| 3                          | -0,01            | 0,06           | -0,04          | 1,07                 | 0,93           | 0,99           | 63%                       | 72%            | 69%            | [-1,9;1,6]       | [-1,5;1,5]     | [-1,6;1,8]     |
| 4                          | 0,05             | -0,02          | 0,07           | 1,00                 | 0,82           | 0,91           | 67%                       | 79%            | 71%            | [-1,6;1,5]       | [-1,4;1,3]     | [-1,3;1,6]     |
| 5                          | 0,07             | 0,00           | 0,03           | 0,96                 | 0,84           | 0,85           | 70%                       | 76%            | 74%            | [-1,6;1,5]       | [-1,5;1,3]     | [-1,3;1,3]     |
| 6                          | 0,04             | 0,02           | 0,02           | 0,85                 | 0,78           | 0,78           | 79%                       | 81%            | 81%            | [-1,4;1,3]       | [-1,3;1,2]     | [-1,3;1,2]     |
| 7                          | 0,02             | -0,01          | 0,04           | 0,82                 | 0,80           | 0,71           | 80%                       | 82%            | 84%            | [-1,3;1,2]       | [-1,4;1,2]     | [-1,1;1,1]     |
| 8                          | 0,00             | 0,06           | 0,03           | 0,78                 | 0,80           | 0,71           | 81%                       | 78%            | 84%            | [-1,4;1,2]       | [-1,3;1,3]     | [-1,2;1,2]     |
| 9                          | 0,06             | 0,03           | 0,04           | 0,78                 | 0,76           | 0,73           | 80%                       | 81%            | 84%            | [-1,2;1,2]       | [-1,2;1,2]     | [-1,2;1,2]     |
| 10                         | 0,04             | 0,02           | 0,09           | 0,78                 | 0,75           | 0,70           | 80%                       | 83%            | 85%            | [-1,2;1,2]       | [-1,4;1,2]     | [-1,0;1,2]     |
| 11                         | 0,03             | 0,12           | 0,04           | 0,73                 | 0,74           | 0,71           | 84%                       | 82%            | 84%            | [-1,3;1,2]       | [-1,1;1,2]     | [-1,1;1,1]     |
| 12                         | 0,09             | 0,04           | 0,03           | 0,73                 | 0,69           | 0,69           | 83%                       | 86%            | 84%            | [-1,1;1,1]       | [-1,1;1,1]     | [-1,1;1,1]     |
| 13                         | 0,06             | 0,07           | 0,04           | 0,72                 | 0,70           | 0,68           | 83%                       | 85%            | 85%            | [-1,1;1,2]       | [-1,1;1,1]     | [-1,1;1,0]     |
| 14                         | 0,05             | 0,05           | 0,04           | 0,70                 | 0,67           | 0,66           | 86%                       | 86%            | 87%            | [-1,1;1,1]       | [-1,0;1,1]     | [-1,1;1,0]     |
| Estrategia Días Aleatorios |                  |                |                |                      |                |                |                           |                |                |                  |                |                |
| 2                          | 0,00             | -0,03          | 0,04           | 1,09                 | 0,83           | 0,93           | 65%                       | 81%            | 74%            | [-1,9;1,5]       | [-1,4;1,2]     | [-1,3;1,7]     |
| 3                          | -0,02            | 0,01           | 0,00           | 0,86                 | 0,67           | 0,82           | 78%                       | 89%            | 78%            | [-1,5;1,3]       | [-1,1;1,0]     | [-1,3;1,4]     |
| 4                          | 0,02             | -0,01          | 0,01           | 0,74                 | 0,57           | 0,66           | 82%                       | 94%            | 88%            | [-1,2;1,1]       | [-0,9;0,9]     | [-1,0;1,2]     |
| 5                          | 0,03             | -0,03          | -0,05          | 0,68                 | 0,49           | 0,59           | 85%                       | 95%            | 90%            | [-1,2;1,0]       | [-0,8;0,8]     | [-1,0;1,0]     |
| 6                          | -0,06            | 0,03           | 0,01           | 0,64                 | 0,45           | 0,53           | 88%                       | 96%            | 95%            | [-1,1;0,9]       | [-0,7;0,8]     | [-0,8;0,9]     |
| 7                          | 0,05             | -0,02          | 0,00           | 0,60                 | 0,43           | 0,48           | 91%                       | 98%            | 97%            | [-1,0;1,0]       | [-0,7;0,7]     | [-0,7;0,8]     |
| 8                          | 0,01             | 0,02           | -0,01          | 0,52                 | 0,39           | 0,47           | 96%                       | 99%            | 98%            | [-0,8;0,8]       | [-0,6;0,7]     | [-0,8;0,8]     |
| 9                          | 0,03             | 0,00           | -0,04          | 0,51                 | 0,38           | 0,43           | 96%                       | 99%            | 99%            | [-0,8;0,8]       | [-0,6;0,6]     | [-0,7;0,7]     |
| 10                         | 0,01             | -0,01          | -0,02          | 0,47                 | 0,37           | 0,43           | 96%                       | 100%           | 98%            | [-0,8;0,7]       | [-0,7;0,6]     | [-0,7;0,7]     |
| 11                         | -0,01            | 0,00           | -0,02          | 0,43                 | 0,33           | 0,40           | 99%                       | 100%           | 98%            | [-0,7;0,7]       | [-0,6;0,5]     | [-0,7;0,6]     |
| 12                         | -0,01            | 0,00           | 0,00           | 0,41                 | 0,35           | 0,37           | 99%                       | 100%           | 100%           | [-0,8;0,6]       | [-0,5;0,6]     | [-0,6;0,6]     |
| 13                         | -0,02            | -0,02          | 0,01           | 0,42                 | 0,30           | 0,38           | 99%                       | 100%           | 99%            | [-0,7;0,7]       | [-0,6;0,5]     | [-0,6;0,6]     |
| 14                         | -0,02            | -0,01          | 0,00           | 0,41                 | 0,30           | 0,35           | 99%                       | 100%           | 100%           | [-0,7;0,7]       | [-0,5;0,5]     | [-0,5;0,6]     |

Tabla 5.1.2. Estadísticos del error cometido en la estimación de niveles sonoros anuales  
(en dB) al tomar estrategias de medición de días continuos y aleatorios  
correspondientes a los niveles  $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$  ( $L_E$ ) y  $L_{NIGHT}$  ( $L_N$ ) en la localización A.

| Localización |           |           |       |       |           |           |       |       |           |           |       |       |           |           |       |       |
|--------------|-----------|-----------|-------|-------|-----------|-----------|-------|-------|-----------|-----------|-------|-------|-----------|-----------|-------|-------|
|              | B         |           |       |       | C         |           |       |       | D         |           |       |       | E         |           |       |       |
| Días         | $L_{DEN}$ | $L_{DAY}$ | $L_E$ | $L_N$ | $L_{DEN}$ | $L_{DAY}$ | $L_E$ | $L_N$ | $L_{DEN}$ | $L_{DAY}$ | $L_E$ | $L_N$ | $L_{DEN}$ | $L_{DAY}$ | $L_E$ | $L_N$ |
| 2            | 66%       | 50%       | 62%   | 48%   | 65%       | 38%       | 57%   | 48%   | 79%       | 54%       | 69%   | 60%   | 68%       | 56%       | 53%   | 51%   |
| 3            | 73%       | 54%       | 65%   | 51%   | 65%       | 41%       | 64%   | 53%   | 82%       | 59%       | 72%   | 71%   | 71%       | 59%       | 56%   | 53%   |
| 4            | 76%       | 64%       | 71%   | 66%   | 62%       | 47%       | 65%   | 62%   | 83%       | 64%       | 77%   | 75%   | 75%       | 63%       | 58%   | 59%   |
| 5            | 78%       | 68%       | 72%   | 74%   | 64%       | 47%       | 67%   | 70%   | 83%       | 68%       | 76%   | 80%   | 79%       | 66%       | 63%   | 64%   |
| 6            | 77%       | 70%       | 72%   | 78%   | 67%       | 57%       | 71%   | 77%   | 82%       | 73%       | 78%   | 87%   | 81%       | 64%       | 66%   | 65%   |
| 7            | 76%       | 76%       | 73%   | 80%   | 64%       | 56%       | 74%   | 78%   | 84%       | 75%       | 77%   | 88%   | 84%       | 68%       | 68%   | 71%   |
| 8            | 74%       | 70%       | 73%   | 81%   | 70%       | 57%       | 72%   | 76%   | 82%       | 78%       | 75%   | 87%   | 79%       | 67%       | 70%   | 73%   |
| 9            | 79%       | 72%       | 76%   | 79%   | 70%       | 59%       | 72%   | 78%   | 81%       | 75%       | 80%   | 91%   | 82%       | 74%       | 69%   | 71%   |
| 10           | 78%       | 73%       | 74%   | 78%   | 66%       | 56%       | 75%   | 81%   | 85%       | 78%       | 79%   | 87%   | 84%       | 71%       | 72%   | 74%   |
| 11           | 82%       | 75%       | 76%   | 78%   | 72%       | 57%       | 75%   | 78%   | 86%       | 76%       | 76%   | 92%   | 81%       | 73%       | 74%   | 73%   |
| 12           | 79%       | 77%       | 71%   | 80%   | 67%       | 54%       | 75%   | 80%   | 88%       | 79%       | 80%   | 90%   | 83%       | 70%       | 77%   | 75%   |
| 13           | 79%       | 76%       | 74%   | 78%   | 74%       | 59%       | 79%   | 82%   | 87%       | 80%       | 81%   | 91%   | 89%       | 76%       | 77%   | 77%   |
| 14           | 80%       | 75%       | 72%   | 78%   | 75%       | 60%       | 78%   | 84%   | 89%       | 79%       | 79%   | 91%   | 83%       | 75%       | 78%   | 77%   |

Tabla 5.1.3. Probabilidad de la banda [-1; +1] dB para cada nivel sonoro y localización correspondiente a la estrategia de días continuos. ( $L_E = L_{EVENING}$ ;  $L_N = L_{NIGHT}$ )

| Localización |           |           |       |       |           |           |       |       |           |           |       |       |           |           |       |       |
|--------------|-----------|-----------|-------|-------|-----------|-----------|-------|-------|-----------|-----------|-------|-------|-----------|-----------|-------|-------|
|              | B         |           |       |       | C         |           |       |       | D         |           |       |       | E         |           |       |       |
| Días         | $L_{DEN}$ | $L_{DAY}$ | $L_E$ | $L_N$ | $L_{DEN}$ | $L_{DAY}$ | $L_E$ | $L_N$ | $L_{DEN}$ | $L_{DAY}$ | $L_E$ | $L_N$ | $L_{DEN}$ | $L_{DAY}$ | $L_E$ | $L_N$ |
| 2            | 81%       | 55%       | 76%   | 56%   | 69%       | 45%       | 68%   | 59%   | 87%       | 64%       | 80%   | 73%   | 72%       | 61%       | 55%   | 62%   |
| 3            | 89%       | 70%       | 84%   | 72%   | 76%       | 50%       | 76%   | 67%   | 93%       | 76%       | 87%   | 79%   | 77%       | 67%       | 61%   | 70%   |
| 4            | 94%       | 70%       | 88%   | 74%   | 84%       | 53%       | 81%   | 75%   | 93%       | 81%       | 91%   | 85%   | 82%       | 75%       | 72%   | 74%   |
| 5            | 95%       | 79%       | 93%   | 81%   | 84%       | 61%       | 84%   | 80%   | 95%       | 83%       | 92%   | 89%   | 87%       | 79%       | 78%   | 82%   |
| 6            | 96%       | 83%       | 94%   | 86%   | 88%       | 61%       | 89%   | 87%   | 96%       | 89%       | 93%   | 92%   | 90%       | 82%       | 78%   | 82%   |
| 7            | 98%       | 87%       | 96%   | 91%   | 88%       | 65%       | 91%   | 85%   | 100%      | 89%       | 94%   | 93%   | 91%       | 84%       | 81%   | 86%   |
| 8            | 99%       | 86%       | 97%   | 90%   | 93%       | 69%       | 92%   | 90%   | 100%      | 91%       | 95%   | 94%   | 94%       | 86%       | 85%   | 86%   |
| 9            | 99%       | 91%       | 98%   | 90%   | 93%       | 75%       | 96%   | 92%   | 98%       | 93%       | 97%   | 97%   | 94%       | 90%       | 91%   | 91%   |
| 10           | 99%       | 91%       | 98%   | 94%   | 94%       | 75%       | 96%   | 95%   | 98%       | 93%       | 97%   | 95%   | 94%       | 90%       | 92%   | 93%   |
| 11           | 100%      | 91%       | 100%  | 96%   | 94%       | 75%       | 97%   | 95%   | 100%      | 96%       | 98%   | 96%   | 96%       | 96%       | 91%   | 92%   |
| 12           | 100%      | 93%       | 99%   | 96%   | 95%       | 80%       | 99%   | 94%   | 100%      | 98%       | 99%   | 100%  | 97%       | 95%       | 95%   | 95%   |
| 13           | 100%      | 95%       | 100%  | 96%   | 96%       | 79%       | 99%   | 97%   | 100%      | 98%       | 100%  | 100%  | 98%       | 95%       | 96%   | 94%   |
| 14           | 100%      | 96%       | 100%  | 98%   | 96%       | 83%       | 99%   | 96%   | 100%      | 99%       | 100%  | 100%  | 97%       | 94%       | 95%   | 94%   |

Tabla 5.1.4. Probabilidad de la banda [-1; +1] dB para cada nivel sonoro y localización correspondiente a la estrategia de días aleatorios. ( $L_E = L_{EVENING}$ ;  $L_N = L_{NIGHT}$ )

Dichos resultados coinciden en cuanto a conclusiones generales con los obtenidos en la referencia [16] para todos los niveles. (Tomar la estrategia de días aleatorios es mejor frente a tomar la estrategia de días continuos. Al tomar más días de medición la dispersión de los datos es menor, y por tanto mayor fiabilidad en la estimación. A partir de un determinado número de días, las estadísticas no mejoran de forma significativa).

No obstante, los resultados numéricos entre unas localizaciones y otras difieren ligeramente, como puede observarse en las figuras 5.1.1 y 5.1.2 para el nivel  $L_{DEN}$ , (para el resto de niveles consultar los anexos) siendo estas diferencias menores para la estrategia de días aleatorios que para la estrategia de días continuos, pues el margen de la diferencia entre la localización con peores resultados y la que presenta mejores resultados es menor para la estrategia de días aleatorios que para días continuos. En la misma figura también se observa una mayor diferencia para la localización C respecto del resto de estaciones aplicable a la variabilidad de los datos de esa estación en los años 2001 y 2005. Si se excluyen las muestras correspondientes a esos dos años en esta localización, los resultados son entonces similares a los encontrados para el resto de localizaciones, no observándose tal diferencia.

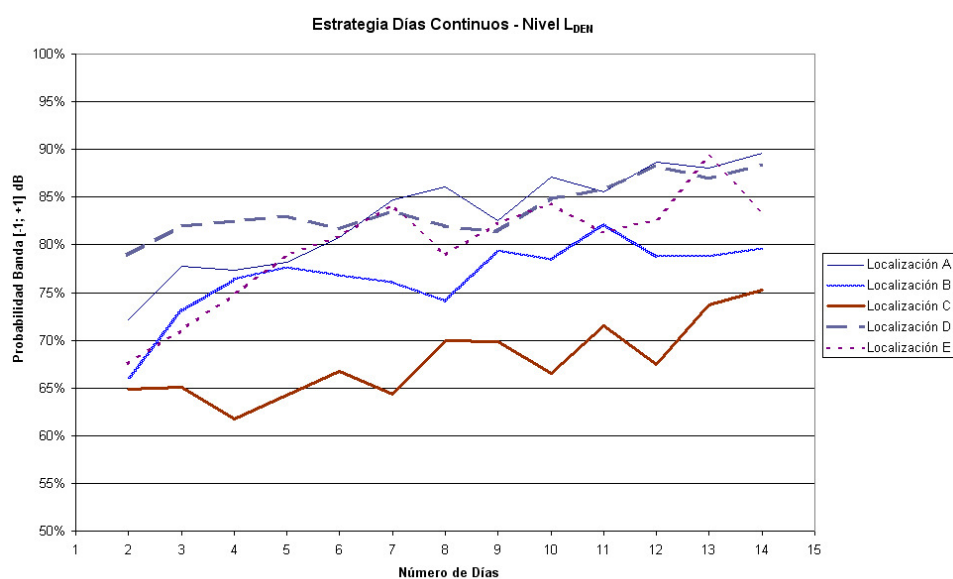


Figura 5.1.1. Banda prob.  $\pm 1$  dB para la estrategia de días continuos y nivel  $L_{DEN}$ .

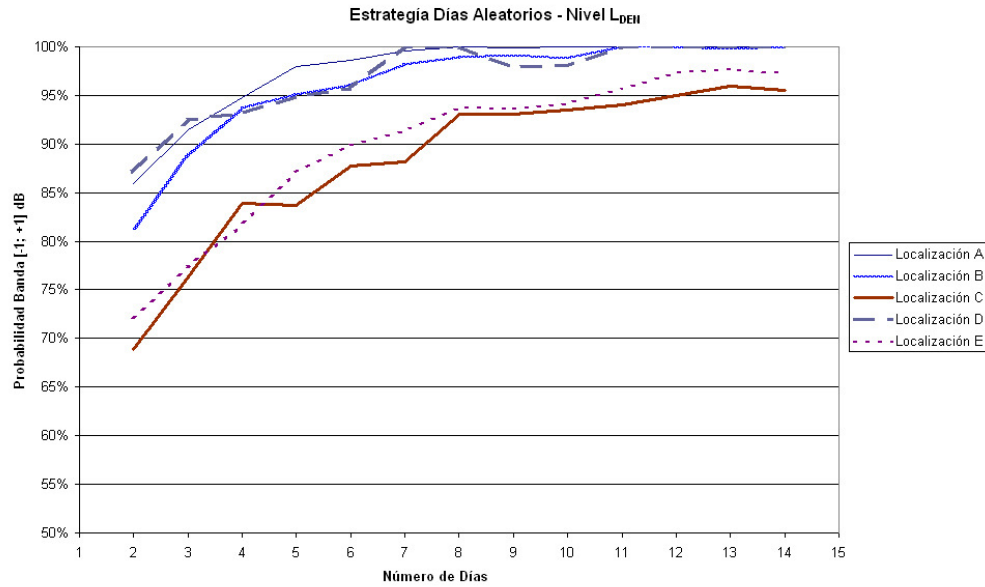


Figura 5.1.2. Banda prob.  $\pm 1$  dB para la estrategia de días aleatorios y nivel  $L_{DEN}$ .

Analizando la comparación de los resultados obtenidos para cada uno de los niveles  $L_{DEN}$ ,  $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$  y  $L_{NIGHT}$  en cada localización, se observa que para la estrategia de días aleatorios en todas las localizaciones el mayor error en la estimación del nivel anual se corresponden al nivel  $L_{DAY}$  (excluyendo la localización E), mientras que el nivel sonoro  $L_{DEN}$  presenta el menor error. Esta conclusión no se muestra claramente en la estrategia de días continuos, donde los mejores resultados corresponden al nivel  $L_{DEN}$  en las localizaciones A, B y E, pero en las localizaciones C y D los mejores resultados se corresponden con el nivel  $L_{NIGHT}$  (con la excepción de las estrategias de 2, 3, 4 y 5 días).

Para la comparación entre los niveles  $L_{EVENING}$  y  $L_{NIGHT}$  se puede observar que en la estrategia de días aleatorios el nivel  $L_{EVENING}$  presenta menores errores (con la excepción de los resultados en la localización E), mientras que en la estrategia de días continuos es el nivel  $L_{NIGHT}$  el que presenta mejores resultados (menores errores), con la excepción de tomar pocos días (2, 3, 4 y 5 días continuos). Sin embargo, a medida que

se toma una estrategia con mayor número de días las estadísticas del error cometido en la estimación de cada uno de los niveles son más parecidas. Resultado que es más claro para la estrategia de días aleatorios que para la de días continuos.

Asimismo, si se considera las estrategias de medición tomando, exclusivamente, los días laborables se ha encontrado que, independientemente de si se toman días aleatorios o días continuos, para todas las estaciones se obtienen mejores estimaciones considerando sólo los días laborables que la correspondiente a tomar todos los días del año, si bien dicha mejora es mayor cuando el número de días de la estrategia es pequeño, pues al tomar una estrategia con un número de días mayor las diferencias en el error al tomar días laborables y tomar todos los días son cada vez más cercanas.

La posible explicación de este efecto podría ser debido, por una parte a las ligeras desviaciones en los niveles sonoros en días festivos y fines de semana respecto de los días laborables (tal y como se observó en el apartado 4.3 de la presente Tesis Doctoral). Por tanto, si se incluyera un determinado factor de corrección para estos días se podrían evitar las diferencias observadas en las predicciones. Además se debe tener en cuenta el efecto de que la variabilidad de los niveles sonoros en días laborables es, de forma general, menor que la correspondiente a tomar todos los días.

No obstante estos resultados son más claros para la estrategia de días aleatorios que para la estrategia de días continuos y para los niveles  $L_{DAY}$  y  $L_{NIGHT}$ , ya que para los niveles  $L_{DEN}$  y  $L_{EVENING}$  las diferencias entre considerar días laborables y todos los días no presentan grandes diferencias. Resultado que puede observarse más claramente en las figuras 5.1.3 y 5.1.4 para la localización B (consultar anexos para el resto de localizaciones).

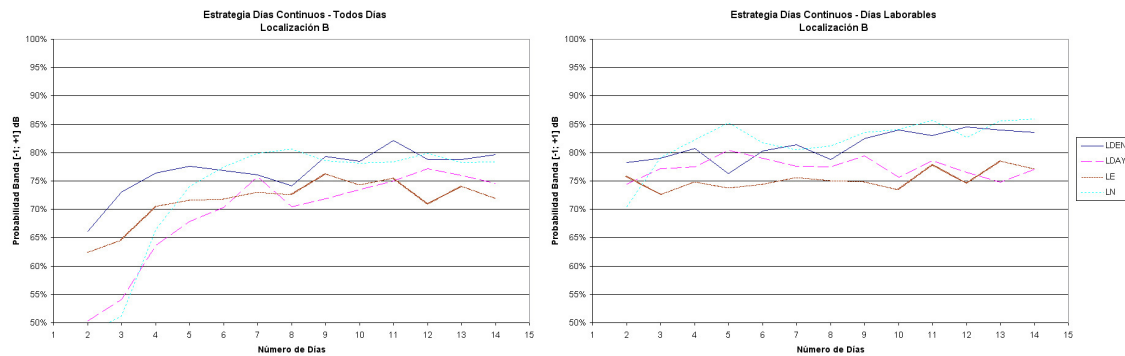


Figura 5.1.3. Probabilidad banda  $\pm 1$  dB de cada uno de los niveles sonoros para la estrategia de días continuos todos los días y sólo días laborables en la localización B.

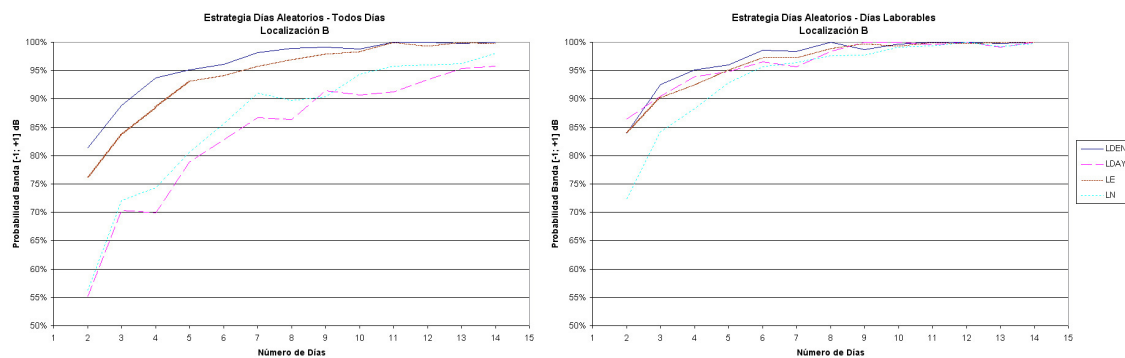


Figura 5.1.4. Probabilidad banda  $\pm 1$  dB de cada uno de los niveles sonoros para la estrategia de días aleatorios todos los días y sólo días laborables en la localización B.

Finalmente, para cada localización y para cada estrategia, se analizaron cada una de las muestras tomadas (de forma independiente), de forma que analizando las estadísticas de las muestras que presentaban el mayor error en la estimación anual se pueda establecer una metodología que nos permita rechazar o aceptar una determinada muestra. Esta metodología intentó correlacionar el error cometido por la muestra en la estimación de los niveles anuales con la desviación típica que presentara la muestra. Sin embargo, el análisis de los resultados no ha permitido correlacionar la desviación típica con la

probabilidad de cometer un mayor o menor error. A modo de ejemplo la figura 5.1.5 muestra la correlación entre el error cometido en la estimación del nivel anual  $L_{DEN}$  y la desviación típica de la muestra correspondiente a la estrategia de 5 días aleatorios en la localización D. Dicha figura es similar a la encontrada con estrategias de más (o menos) días, para cualquier calle, para cualquier nivel, pero variando la escala de la misma y similar a la obtenida en la estrategia de días continuos.

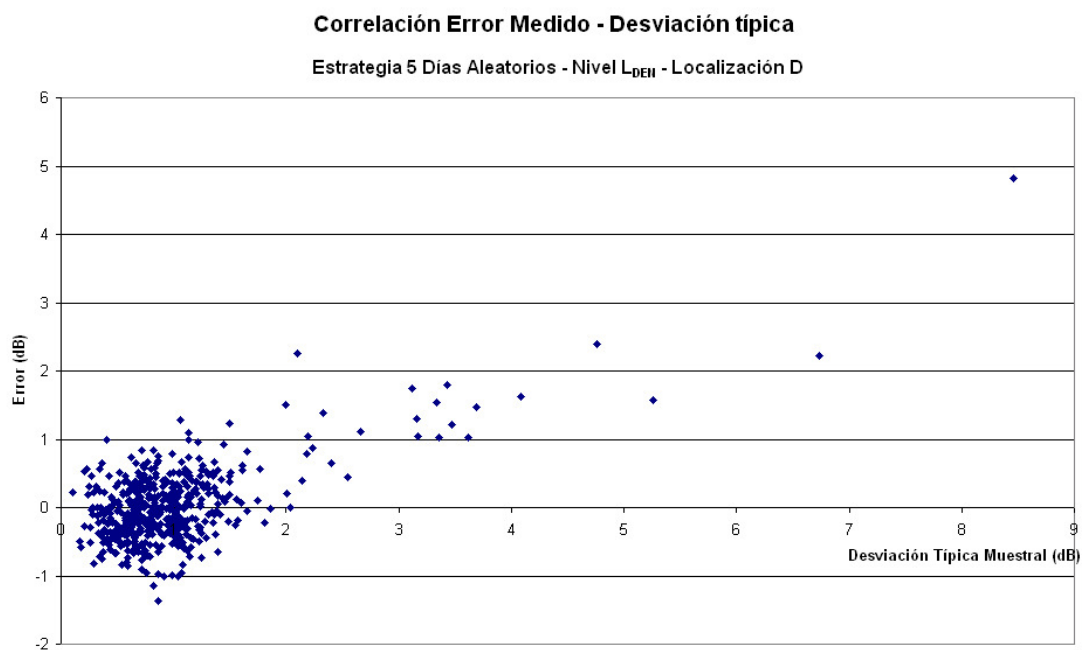


Figura 5.1.5. Correlación entre el error medido y la desviación típica de la muestra para la estrategia de 5 días aleatorios.

De esta forma, en la tabla 5.1.5, correspondiente a la localización A (consultar anexos para el resto), se presenta, para aquellas muestras con una desviación típica mayor de 2 dB, el porcentaje de muestras dentro de la banda de error  $\pm 1$  dB. Asimismo, también se muestra el porcentaje de muestras (con desviación típica superior a 2 dB) que presentan errores fuera de la banda del 90% de probabilidad (lo que serían errores no esperados) para cada estrategia (ya que a medida que se toma una estrategia con un número de días



cada vez mayor la probabilidad de la banda  $[-1; +1]$  dB aumenta). A la vista de estos datos, no se puede recomendar un máximo valor para la desviación típica del error, ni tampoco el máximo o mínimo valor sonoro de cada muestra, ya que no son comunes en todas las localizaciones. Asimismo, también difieren en función del nivel sonoro analizado.

| Localización A             |                  |                     |              |                  |                     |              |                  |                     |              |                  |                     |              |
|----------------------------|------------------|---------------------|--------------|------------------|---------------------|--------------|------------------|---------------------|--------------|------------------|---------------------|--------------|
| Días                       | $L_{DEN}$        |                     |              | $L_{DAY}$        |                     |              | $L_{EVENING}$    |                     |              | $L_{NIGHT}$      |                     |              |
|                            | $\sigma$<br>>2dB | Banda<br>$\pm 1$ dB | Fuera<br>90% | $\sigma$<br>>2dB | Banda<br>$\pm 1$ dB | Fuera<br>90% | $\sigma$<br>>2dB | Banda<br>$\pm 1$ dB | Fuera<br>90% | $\sigma$<br>>2dB | Banda<br>$\pm 1$ dB | Fuera<br>90% |
| Estrategia Días Continuos  |                  |                     |              |                  |                     |              |                  |                     |              |                  |                     |              |
| 2                          | 1%               | 33%                 | 67%          | 10%              | 58%                 | 4%           | 1%               | 14%                 | 57%          | 4%               | 48%                 | 33%          |
| 3                          | 1%               | 50%                 | 0%           | 9%               | 45%                 | 14%          | 3%               | 0%                  | 38%          | 1%               | 75%                 | 0%           |
| 5                          | 1%               | 60%                 | 40%          | 5%               | 52%                 | 24%          | 1%               | 67%                 | 33%          | 2%               | 50%                 | 38%          |
| 7                          | 1%               | 0%                  | 100%         | 4%               | 79%                 | 16%          | 1%               | 43%                 | 57%          | 3%               | 80%                 | 20%          |
| 10                         | 0%               | 0%                  | 100%         | 4%               | 78%                 | 17%          | 1%               | 50%                 | 33%          | 2%               | 73%                 | 18%          |
| 14                         | 1%               | 100%                | 0%           | 3%               | 100%                | 0%           | 2%               | 75%                 | 25%          | 2%               | 70%                 | 30%          |
| Estrategia Días Aleatorios |                  |                     |              |                  |                     |              |                  |                     |              |                  |                     |              |
| 2                          | 4%               | 71%                 | 24%          | 17%              | 58%                 | 16%          | 9%               | 60%                 | 22%          | 13%              | 77%                 | 11%          |
| 3                          | 3%               | 86%                 | 14%          | 21%              | 68%                 | 15%          | 6%               | 66%                 | 34%          | 11%              | 76%                 | 13%          |
| 5                          | 1%               | 75%                 | 75%          | 13%              | 82%                 | 9%           | 3%               | 88%                 | 18%          | 6%               | 84%                 | 19%          |
| 7                          | 0%               | 50%                 | 50%          | 12%              | 81%                 | 19%          | 1%               | 67%                 | 67%          | 2%               | 100%                | 18%          |
| 10                         | 0%               | 0%                  | 0%           | 8%               | 87%                 | 18%          | 2%               | 75%                 | 50%          | 2%               | 75%                 | 33%          |
| 14                         | 1%               | 100%                | 57%          | 5%               | 96%                 | 36%          | 1%               | 100%                | 20%          | 2%               | 78%                 | 44%          |

Tabla 5.1.5. Porcentaje de muestras dentro de la banda  $\pm 1$  dB y fuera de la banda del 90% de probabilidad para las muestras con desviación típica superior a 2 dB en la localización A.

La única característica encontrada es que para los niveles  $L_{DEN}$  y  $L_{EVENING}$  la probabilidad de encontrar muestras con desviación típica superior a 2 dB es muy baja y, en este caso, podría tomarse como referencia para rechazar muestras. Sin embargo, en este caso, debe añadirse que existe un porcentaje de muestras con desviación típica superior a 2 dB con pequeños errores, lo que llevaría a rechazar muestras correctas.

Para los niveles sonoros  $L_{DAY}$  y  $L_{NIGHT}$  este resultado no se muestra de forma clara en todas las localizaciones siendo los porcentajes de muestras con desviación típica superior a 2 dB mayores que los encontrados para los niveles  $L_{DEN}$  y  $L_{EVENING}$ . Asimismo, comparando las estrategias de días continuos y aleatorios se observa que el porcentaje de muestras con desviación típica mayor que 2 dB es, siempre, menor para la estrategia de días continuos que para la estrategia de días aleatorios con independencia del nivel sonoro evaluado.

### 5.1.3 NÚMERO DE DÍAS DE MEDICIÓN DE NIVELES SONOROS PARA LA ESTIMACIÓN DE PERIODOS DE 7, 14 Y 28 DÍAS.

Para evaluar la precisión en la estimación de medidas correspondientes a 7, 14 y 28 días en continuo a partir de medidas de menor duración se ha procedido a calcular para cada una de esas estimaciones el tiempo de estabilización [33 – 36]. El tiempo de estabilización, para nuestro caso se entiende como el número de días a partir del cual el nivel equivalente acumulado para ese número de días difiere en menos de un determinado error respecto del nivel equivalente global del período de tiempo evaluado. Es decir, se realiza una serie temporal comparando los niveles acumulados de 1 día, de dos días de tres días, etc....con el nivel equivalente del periodo evaluado (7, 14 ó 28 días), cuando el error esté dentro de una franja de  $\pm 1$  dB tendremos el tiempo de estabilización  $t_{\pm 1dB}$ , y lo mismo para la franja  $\pm 2$  dB, como se muestra, a modo de ejemplo, en la figura 5.1.6, correspondiente a la estimación del nivel  $L_{DEN}$  de 28 días.

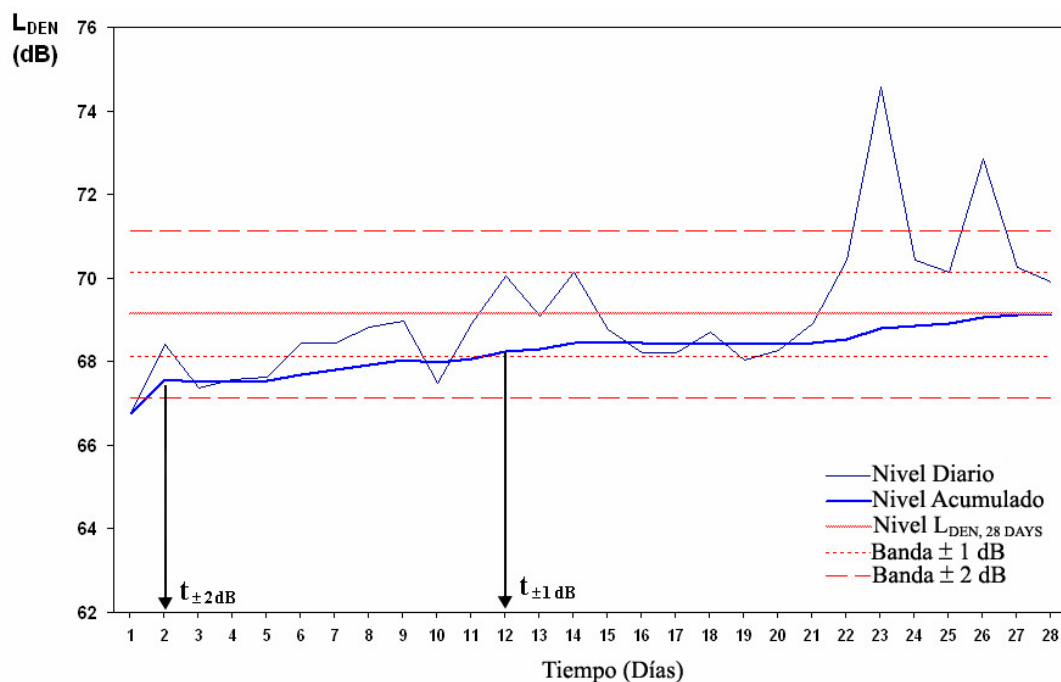


Figura 5.1.6. Tiempo de estabilización del nivel  $L_{DEN}$  de 28 días de una muestra.

En nuestro caso los períodos de evaluación se corresponden a medidas de 7, 14 y 28 días y como errores de referencia para los tiempos de estabilización se ha tomado la franja  $\pm 1$  dB y  $\pm 2$  dB. El procedimiento seguido ha consistido en tomar, para cada una de las estaciones de medición, un número representativo de muestras aleatorias (100 muestras por año, en total 500 muestras por localización) de 7, 14 y 28 días de duración, determinando los tiempos de estabilización para cada una de las muestras y de forma independiente para cada uno de los niveles  $L_{DEN}$ ,  $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$  y  $L_{NIGHT}$ .

En la tabla 5.1.6, se ilustra el tiempo de estabilización (en días) para cada una de las localizaciones y para los distintos períodos de estimación (7, 14 y 28 días de duración) para el 95% de los datos. De esta forma, la tabla muestra el límite superior para el tiempo de estabilización, es decir, para la estimación del nivel sonoro  $L_{DEN}$  de 14 días de duración en la localización C, el tiempo de estabilización para la banda  $\pm 1$  dB,  $t_{\pm 1dB}$ , es de 7 días, esto implica que para el 95% de las muestras tomadas el tiempo de estabilización es igual o menor a 7 días. De esta forma, para los datos proporcionados en esta tabla existe un porcentaje de muestras con tiempos de estabilización menores que el tiempo de estabilización dado por la tabla. Asimismo, en esta tabla, también se proporciona la variación en el tiempo de estabilización entre localizaciones. Se puede observar que, en general, el nivel  $L_{DEN}$  presenta mejores tiempos de estabilización en cada localización, mientras que el nivel sonoro  $L_{DAY}$  presenta los peores resultados. Al comparar entre localizaciones, la localización D presenta, en general, menores tiempos de estabilización que el resto de localizaciones, mientras que la localización E es la que mayores tiempos de estabilización presenta. De esta forma, y para la estimación de períodos de 7 y 14 días de duración, las diferencias en el tiempo de estabilización entre las localizaciones A, B y D no son importantes, sin embargo, estas diferencias son

mayores para el período de 28 días de duración, no sólo entre estas localizaciones, sino comparando con todas las localizaciones.

| Período estimación  |               |               |               |               |               |               |
|---------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|                     | 7 Días        |               | 14 Días       |               | 28 Días       |               |
|                     | $t_{\pm 1dB}$ | $t_{\pm 2dB}$ | $t_{\pm 1dB}$ | $t_{\pm 2dB}$ | $t_{\pm 1dB}$ | $t_{\pm 2dB}$ |
| Nivel $L_{DEN}$     |               |               |               |               |               |               |
| <b>A</b>            | 2             | 1             | 4             | 1             | 10            | 1             |
| <b>B</b>            | 3             | 1             | 3             | 1             | 6             | 1             |
| <b>C</b>            | 4             | 2             | 7             | 2             | 14            | 2             |
| <b>D</b>            | 2             | 1             | 3             | 1             | 4             | 1             |
| <b>E</b>            | 5             | 2             | 8             | 3             | 13            | 4             |
| <b>Variación</b>    | 2 – 5         | 1 – 2         | 3 – 8         | 1 – 3         | 4 – 13        | 1 – 4         |
| Nivel $L_{DAY}$     |               |               |               |               |               |               |
| <b>A</b>            | 5             | 2             | 6             | 3             | 12            | 3             |
| <b>B</b>            | 5             | 3             | 7             | 3             | 11            | 4             |
| <b>C</b>            | 6             | 4             | 10            | 5             | 20            | 9             |
| <b>D</b>            | 5             | 3             | 6             | 3             | 6             | 2             |
| <b>E</b>            | 5             | 3             | 8             | 3             | 14            | 6             |
| <b>Variación</b>    | 5 – 6         | 2 – 4         | 6 – 10        | 3 – 5         | 6 – 20        | 2 – 9         |
| Nivel $L_{EVENING}$ |               |               |               |               |               |               |
| <b>A</b>            | 3             | 1             | 5             | 1             | 13            | 3             |
| <b>B</b>            | 3             | 1             | 4             | 1             | 5             | 2             |
| <b>C</b>            | 4             | 2             | 6             | 2             | 8             | 3             |
| <b>D</b>            | 3             | 1             | 4             | 1             | 7             | 1             |
| <b>E</b>            | 5             | 3             | 7             | 4             | 12            | 4             |
| <b>Variación</b>    | 3 – 5         | 1 – 3         | 4 – 7         | 1 – 4         | 5 – 13        | 1 – 4         |
| Nivel $L_{NIGHT}$   |               |               |               |               |               |               |
| <b>A</b>            | 4             | 1             | 5             | 2             | 10            | 2             |
| <b>B</b>            | 5             | 3             | 6             | 3             | 6             | 3             |
| <b>C</b>            | 5             | 3             | 6             | 3             | 7             | 3             |
| <b>D</b>            | 5             | 2             | 6             | 2             | 6             | 2             |
| <b>E</b>            | 5             | 3             | 9             | 4             | 14            | 5             |
| <b>Variación</b>    | 4 – 5         | 1 – 3         | 5 – 9         | 2 – 4         | 6 – 14        | 2 – 5         |

Tabla 5.1.6. Tiempo de estabilización (en días) para cada nivel sonoro y localización para distintos períodos de estimación.

De la misma tabla, también se puede observar, que el tiempo de estabilización para la banda  $\pm 2$  dB,  $t_{\pm 2dB}$ , es menor que el tiempo de estabilización para la banda  $\pm 1$  dB,  $t_{\pm 1dB}$ , (como lo esperado), observando que para los niveles sonoros  $L_{DEN}$ ,  $L_{EVENING}$  y  $L_{NIGHT}$ , se pueden tomar 3 días (como un valor de referencia a partir del peor resultado), como

tiempo de estabilización para un error  $\pm 2$  dB,  $t_{\pm 2dB}$ , con independencia del período de tiempo evaluado (7, 14 y 28 días), con la exclusión de la localización E. En este punto, para el tiempo de estabilización de  $\pm 1$  dB,  $t_{\pm 1dB}$ , es más difícil de establecer un determinado número de días como tiempo de estabilización para los diferentes períodos de tiempo y para los distintos niveles sonoros evaluados.

De la misma forma, en las tablas 5.1.7 – 5.1.10 se puede observar el porcentaje de muestras con un determinado número de días como tiempo de estabilización para cada una de las localizaciones y para cada nivel sonoro. En estas tablas, la última columna muestra la máxima diferencia del porcentaje entre cada localización, pudiéndose observar que estas diferencias disminuyen tomando un mayor número de días como tiempo de estabilización, observándose este resultado más claramente para los niveles  $L_{DEN}$  y  $L_{EVENING}$ . Por ejemplo, para la estimación del nivel  $L_{DEN}$  correspondiente a 28 días se puede observar que si se toma 1 día de medición como referencia, el porcentaje de muestras dentro del margen de error  $\pm 1$  dB es del 87% para la localización D y del 58% para la localización E (29% de diferencia entre las localizaciones), mientras que si se toma un tiempo de referencia de 7 días el mejor porcentaje es del 98% para la localización B (97% para la localización D) y del 86% para la localización E, reduciéndose al 12% la diferencia entre las localizaciones al 12%

|                  | Localización               |     |     |     |     |      |
|------------------|----------------------------|-----|-----|-----|-----|------|
|                  | A                          | B   | C   | D   | E   | Dif. |
| $t_{\pm 1dB}$    | Período Estimación 7 Días  |     |     |     |     |      |
| <b>1 día</b>     | 89%                        | 85% | 81% | 89% | 66% | 23%  |
| <b>≤ 2 días</b>  | 96%                        | 91% | 91% | 95% | 77% | 19%  |
| <b>≤ 3 días</b>  | 98%                        | 96% | 94% | 97% | 88% | 10%  |
|                  | Período Estimación 14 Días |     |     |     |     |      |
| <b>1 día</b>     | 86%                        | 81% | 74% | 89% | 60% | 29%  |
| <b>≤ 2 días</b>  | 92%                        | 88% | 81% | 94% | 66% | 28%  |
| <b>≤ 3 días</b>  | 94%                        | 95% | 87% | 95% | 75% | 20%  |
| <b>≤ 5 días</b>  | 96%                        | 98% | 93% | 98% | 85% | 13%  |
| <b>≤ 7 días</b>  | 98%                        | 99% | 95% | 99% | 93% | 6%   |
|                  | Período Estimación 28 Días |     |     |     |     |      |
| <b>1 días</b>    | 80%                        | 79% | 76% | 87% | 58% | 29%  |
| <b>≤ 2 días</b>  | 83%                        | 85% | 79% | 91% | 66% | 25%  |
| <b>≤ 3 días</b>  | 89%                        | 88% | 82% | 94% | 73% | 21%  |
| <b>≤ 5 días</b>  | 92%                        | 94% | 87% | 97% | 80% | 17%  |
| <b>≤ 7 días</b>  | 93%                        | 98% | 91% | 97% | 86% | 12%  |
| <b>≤ 10 días</b> | 95%                        | 99% | 93% | 97% | 91% | 8%   |
| <b>≤ 14 días</b> | 98%                        | 99% | 96% | 99% | 97% | 3%   |

Tabla 5.1.7. Porcentaje de muestras con un determinado número de días como tiempo de estabilización,  $t_{\pm 1dB}$ , para el nivel  $L_{DEN}$ .

|                  | Localización               |     |     |      |     |      |
|------------------|----------------------------|-----|-----|------|-----|------|
|                  | A                          | B   | C   | D    | E   | Dif. |
| $t_{\pm 1dB}$    | Período Estimación 7 Días  |     |     |      |     |      |
| <b>1 día</b>     | 57%                        | 42% | 33% | 52%  | 54% | 24%  |
| <b>≤ 2 días</b>  | 71%                        | 54% | 41% | 65%  | 71% | 30%  |
| <b>≤ 3 días</b>  | 83%                        | 64% | 49% | 78%  | 84% | 35%  |
|                  | Período Estimación 14 Días |     |     |      |     |      |
| <b>1 día</b>     | 58%                        | 40% | 29% | 52%  | 52% | 29%  |
| <b>≤ 2 días</b>  | 72%                        | 49% | 39% | 64%  | 62% | 33%  |
| <b>≤ 3 días</b>  | 82%                        | 59% | 46% | 77%  | 72% | 36%  |
| <b>≤ 5 días</b>  | 93%                        | 88% | 80% | 95%  | 84% | 15%  |
| <b>≤ 7 días</b>  | 99%                        | 99% | 93% | 100% | 92% | 8%   |
|                  | Período Estimación 28 Días |     |     |      |     |      |
| <b>1 días</b>    | 55%                        | 45% | 31% | 54%  | 52% | 24%  |
| <b>≤ 2 días</b>  | 64%                        | 52% | 35% | 62%  | 60% | 29%  |
| <b>≤ 3 días</b>  | 71%                        | 59% | 44% | 73%  | 72% | 29%  |
| <b>≤ 5 días</b>  | 87%                        | 80% | 71% | 89%  | 80% | 18%  |
| <b>≤ 7 días</b>  | 91%                        | 94% | 82% | 99%  | 83% | 17%  |
| <b>≤ 10 días</b> | 94%                        | 95% | 85% | 99%  | 91% | 14%  |
| <b>≤ 14 días</b> | 96%                        | 99% | 93% | 100% | 95% | 7%   |

Tabla 5.1.8. Porcentaje de muestras con un determinado número de días como tiempo de estabilización,  $t_{\pm 1dB}$ , para el nivel  $L_{DAY}$ .



|                  | Localización               |      |     |     |     |      |
|------------------|----------------------------|------|-----|-----|-----|------|
|                  | A                          | B    | C   | D   | E   | Dif. |
| $t_{\pm 1dB}$    | Período Estimación 7 Días  |      |     |     |     |      |
| <b>1 día</b>     | 85%                        | 73%  | 63% | 77% | 42% | 43%  |
| <b>≤ 2 días</b>  | 93%                        | 89%  | 76% | 90% | 60% | 33%  |
| <b>≤ 3 días</b>  | 97%                        | 97%  | 90% | 97% | 76% | 21%  |
|                  | Período Estimación 14 Días |      |     |     |     |      |
| <b>1 día</b>     | 82%                        | 76%  | 63% | 79% | 44% | 38%  |
| <b>≤ 2 días</b>  | 87%                        | 85%  | 71% | 89% | 62% | 27%  |
| <b>≤ 3 días</b>  | 91%                        | 92%  | 81% | 92% | 68% | 24%  |
| <b>≤ 5 días</b>  | 95%                        | 98%  | 95% | 98% | 86% | 12%  |
| <b>≤ 7 días</b>  | 98%                        | 100% | 99% | 99% | 96% | 4%   |
|                  | Período Estimación 28 Días |      |     |     |     |      |
| <b>1 días</b>    | 78%                        | 72%  | 61% | 76% | 45% | 33%  |
| <b>≤ 2 días</b>  | 81%                        | 79%  | 71% | 81% | 56% | 25%  |
| <b>≤ 3 días</b>  | 85%                        | 86%  | 78% | 88% | 64% | 24%  |
| <b>≤ 5 días</b>  | 89%                        | 96%  | 88% | 94% | 78% | 18%  |
| <b>≤ 7 días</b>  | 90%                        | 99%  | 94% | 96% | 89% | 10%  |
| <b>≤ 10 días</b> | 93%                        | 99%  | 96% | 97% | 92% | 7%   |
| <b>≤ 14 días</b> | 96%                        | 100% | 99% | 99% | 97% | 4%   |

Tabla 5.1.9. Porcentaje de muestras con un determinado número de días como tiempo de estabilización,  $t_{\pm 1dB}$ , para el nivel  $L_{EVENING}$ .

| $t_{\pm 1dB}$              | Localización |      |      |     |     |      |
|----------------------------|--------------|------|------|-----|-----|------|
|                            | A            | B    | C    | D   | E   | Dif. |
| Período Estimación 7 Días  |              |      |      |     |     |      |
| <b>1 día</b>               | 55%          | 36%  | 43%  | 58% | 54% | 22%  |
| <b>≤ 2 días</b>            | 67%          | 51%  | 60%  | 68% | 67% | 17%  |
| <b>≤ 3 días</b>            | 82%          | 65%  | 72%  | 84% | 77% | 19%  |
| Período Estimación 14 Días |              |      |      |     |     |      |
| <b>1 día</b>               | 56%          | 37%  | 39%  | 58% | 54% | 21%  |
| <b>≤ 2 días</b>            | 65%          | 53%  | 55%  | 68% | 62% | 15%  |
| <b>≤ 3 días</b>            | 80%          | 62%  | 69%  | 80% | 69% | 18%  |
| <b>≤ 5 días</b>            | 96%          | 94%  | 92%  | 94% | 80% | 16%  |
| <b>≤ 7 días</b>            | 99%          | 99%  | 99%  | 99% | 92% | 7%   |
| Período Estimación 28 Días |              |      |      |     |     |      |
| <b>1 días</b>              | 55%          | 36%  | 38%  | 57% | 50% | 21%  |
| <b>≤ 2 días</b>            | 62%          | 50%  | 54%  | 68% | 59% | 18%  |
| <b>≤ 3 días</b>            | 73%          | 62%  | 63%  | 76% | 64% | 14%  |
| <b>≤ 5 días</b>            | 91%          | 91%  | 85%  | 92% | 76% | 16%  |
| <b>≤ 7 días</b>            | 94%          | 98%  | 95%  | 96% | 83% | 15%  |
| <b>≤ 10 días</b>           | 95%          | 98%  | 98%  | 96% | 88% | 10%  |
| <b>≤ 14 días</b>           | 98%          | 100% | 100% | 99% | 96% | 4%   |

Tabla 5.1.10. Porcentaje de muestras con un determinado número de días como tiempo de estabilización,  $t_{\pm 1dB}$ , para el nivel  $L_{NIGHT}$ .

Por otra parte, (de forma similar a la realizada en el apartado anterior en la estimación de los niveles anuales), se ha procedido a separar los días laborables respecto de considerar todos los días, aplicando la misma metodología pero tomando solo como referencia, para la estimación de períodos de 7, 14 y 28 días, los días laborables. De esta forma, la tabla 5.1.11 resume los resultados para la estimación de niveles sonoros correspondientes a 28 días de duración (para el resto de períodos consultar los anexos) en cada localización. Al comparar estos resultados con los mostrados en las tablas anteriores (tablas 5.1.7 – 5.1.10), se muestra que, excluyendo localización E, los errores en las estimaciones tomando días laborables son menores que los correspondientes a tomar todos los días (siguiendo la misma tendencia que la observada al estimar el nivel anual). Sin embargo, esta conclusión es más clara para los niveles  $L_{DAY}$  y  $L_{NIGHT}$ , donde la mejora porcentual es mayor que para los otros niveles.

Por ejemplo, Para la localización D, Los porcentajes de muestras con un día de medición como tiempo de estabilización  $t_{\pm 1dB}$ , teniendo en cuenta todos los días y para un período de duración de 28 días, para los niveles  $L_{DEN}$ ,  $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$  y  $L_{NIGHT}$  son del 87%, 54%, 76% y 57% respectivamente, mientras que para los días laborables, estos porcentajes son del 91%, 86%, 82% y 81%. En este caso el margen de la diferencia en los resultados para cada nivel sonoro es del 4% para el nivel  $L_{DEN}$ , 32% para el nivel  $L_{DAY}$ , 6% para el nivel  $L_{EVENING}$  y 24% para el nivel  $L_{NIGHT}$ . Sin embargo, este margen de mejora se va reduciendo a medida que se incrementa el número de días tomados como tiempo de estabilización, por ejemplo, para la misma localización D, si se toma como tiempo de estabilización 5 días los porcentajes para cada nivel sonoro  $L_{DEN}$ ,  $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$  y  $L_{NIGHT}$  son, tomando todos los días, del 97%, 89%, 94% y 92% respectivamente, mientras que considerando los días laborables estos porcentajes son del 99%, 97%, 94% y 97%, pasando a ser ahora el margen de mejora para cada nivel

del 2%, 8%, 0% y 5%, siendo este margen de mejora inferior al observado al tomar un día como tiempo de estabilización. En general, el nivel  $L_{DEN}$  registra las menores diferencias entre los porcentajes encontrados al tomar días laborables o tomar todos los días.

| Localización                                 | Número de días |          |          |          |          |           |           |
|--|----------------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|
|  | 1 día          | ≤ 2 días | ≤ 3 días | ≤ 5 días | ≤ 7 días | ≤ 10 días | ≤ 14 días |
| <b>Nivel sonoro <math>L_{DEN}</math></b>     |                |          |          |          |          |           |           |
| <b>A</b>                                     | 86%            | 90%      | 92%      | 94%      | 95%      | 95%       | 98%       |
| <b>B</b>                                     | 85%            | 92%      | 94%      | 96%      | 97%      | 98%       | 99%       |
| <b>C</b>                                     | 90%            | 93%      | 96%      | 96%      | 96%      | 97%       | 98%       |
| <b>D</b>                                     | 91%            | 97%      | 97%      | 99%      | 99%      | 100%      | 100%      |
| <b>E</b>                                     | 62%            | 70%      | 77%      | 84%      | 91%      | 94%       | 98%       |
| <b>Nivel sonoro <math>L_{DAY}</math></b>     |                |          |          |          |          |           |           |
| <b>A</b>                                     | 86%            | 88%      | 88%      | 90%      | 93%      | 95%       | 96%       |
| <b>B</b>                                     | 86%            | 89%      | 93%      | 95%      | 95%      | 96%       | 97%       |
| <b>C</b>                                     | 71%            | 73%      | 79%      | 83%      | 86%      | 88%       | 91%       |
| <b>D</b>                                     | 86%            | 91%      | 94%      | 97%      | 98%      | 99%       | 100%      |
| <b>E</b>                                     | 51%            | 60%      | 66%      | 77%      | 81%      | 87%       | 93%       |
| <b>Nivel sonoro <math>L_{EVENING}</math></b> |                |          |          |          |          |           |           |
| <b>A</b>                                     | 81%            | 88%      | 90%      | 92%      | 94%      | 96%       | 97%       |
| <b>B</b>                                     | 83%            | 89%      | 91%      | 95%      | 98%      | 99%       | 99%       |
| <b>C</b>                                     | 74%            | 81%      | 87%      | 92%      | 95%      | 97%       | 99%       |
| <b>D</b>                                     | 82%            | 85%      | 89%      | 94%      | 95%      | 98%       | 99%       |
| <b>E</b>                                     | 55%            | 63%      | 68%      | 77%      | 84%      | 92%       | 99%       |
| <b>Nivel sonoro <math>L_{NIGHT}</math></b>   |                |          |          |          |          |           |           |
| <b>A</b>                                     | 74%            | 84%      | 90%      | 94%      | 95%      | 96%       | 99%       |
| <b>B</b>                                     | 65%            | 79%      | 90%      | 97%      | 99%      | 99%       | 100%      |
| <b>C</b>                                     | 61%            | 75%      | 85%      | 93%      | 95%      | 98%       | 100%      |
| <b>D</b>                                     | 81%            | 87%      | 92%      | 97%      | 98%      | 99%       | 100%      |
| <b>E</b>                                     | 51%            | 64%      | 69%      | 83%      | 88%      | 93%       | 97%       |

Tabla 5.1.11. Porcentaje de muestras con un margen de error  $\pm 1$  dB al tomar un determinado número de días como tiempo de estabilización,  $t_{\pm 1dB}$ , correspondiente a la estimación de periodos de 28 días laborables.

Contemplando todas las estaciones, podemos concluir que con una probabilidad del 95% los tiempos de estabilización  $t_{\pm 1dB}$  para el nivel  $L_{DEN}$  correspondiente a la estimación de días laborables están entre 2 y 4 días para períodos de estimación de 7 días, entre 5 y 7 días para períodos de 14 días y entre 10 y 15 días para períodos de 28 días. Si bien el límite inferior se corresponde con las estaciones que presentan menor variabilidad y el superior con las de mayor variabilidad. Si el tiempo de estabilización se determina para la franja  $\pm 2$  dB correspondiente a días laborables deben tomarse los tiempos de 1 día para la estimación de períodos de 7 días y entre 1 y 3 días para la estimación de los períodos de 14 y 28 días. Para el resto de niveles, los tiempos de estabilización vienen dados por la tabla 5.1.12.

|                                 | Período Estimado |               |               |               |               |               |
|---------------------------------|------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|                                 | 7 Días           |               | 14 Días       |               | 28 Días       |               |
|                                 | $t_{\pm 1dB}$    | $t_{\pm 2dB}$ | $t_{\pm 1dB}$ | $t_{\pm 2dB}$ | $t_{\pm 1dB}$ | $t_{\pm 2dB}$ |
| <b><math>L_{DEN}</math></b>     | 2 – 4            | 1             | 5 – 8         | 1 – 3         | 10 – 15       | 1 – 3         |
| <b><math>L_{DAY}</math></b>     | 3 – 5            | 1 – 3         | 6 – 10        | 1 – 6         | 10 – 21       | 1 – 8         |
| <b><math>L_{EVENING}</math></b> | 3 – 5            | 1 – 2         | 5 – 7         | 1 – 3         | 9 – 12        | 1 – 3         |
| <b><math>L_{NIGHT}</math></b>   | 3 – 5            | 1 – 3         | 5 – 8         | 1 – 3         | 9 – 12        | 1 – 4         |

Tabla 5.1.12. Tiempo de estabilización (en días) para los niveles  $L_{DEN}$ ,  $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$  y  $L_{NIGHT}$  correspondientes a la estimación de 7, 14 y 28 días laborables contemplando todas las localizaciones (para el 95% datos).

#### 5.1.4 NÚMERO DE HORAS DE MEDICIÓN PARA LA ESTIMACIÓN DE LOS NIVELES SONOROS DIARIOS.

En los apartados anteriores se han estimado los niveles sonoros de larga duración y de media duración, por tanto faltaría determinar niveles sonoros de corta duración. En este apartado se pretende determinar el error cometido en la estimación de los niveles diarios  $L_{DEN}$ ,  $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$  y  $L_{NIGHT}$  a partir de la medición de una o más horas dentro de cada una de las franjas horarias correspondiente a cada nivel. Siguiendo una línea continuista, en cuanto a las estrategias desarrolladas en apartados anteriores para estimaciones de mayor duración, los tipos de estrategia empleados en este análisis han sido por un lado tomar un número determinado de horas de forma aleatoria dentro de la franja horaria (calculando el promedio del nivel sonoro de estas horas y comparándolo con el nivel sonoro correspondiente a la franja donde son extraídas las horas) , y por otro lado tomar un número determinado de horas continuas (con inicio aleatorio) dentro de la franja horaria correspondiente al nivel sonoro evaluado. Asimismo, también se ha optado por distinguir entre estimaciones correspondientes a días laborables y la correspondiente a tomar todos los días.

Previo al análisis del error cometido en cada una de estas estrategias se ha creído conveniente analizar las características de las series de datos correspondientes a cada una de las horas de medición dentro de una franja horaria, de manera que se observe si existen o no diferencias al medir en horas distintas dentro de una misma franja horaria.

Para ello, y teniendo en cuenta que los niveles pueden fluctuar a lo largo del año, a cada nivel horario ( $Leq_{1hora}$ ) se le ha restado el valor del nivel sonoro diario correspondiente a la franja horaria, generando las series de datos :  $Leq_{1hora} - L_{DAY}$  (para cada hora dentro del período 7:00 -19:00),  $Leq_{1hora} - L_{EVENING}$  (para cada hora dentro del período 19:00 –

23:00) y  $Leq_{1hora} - L_{NIGHT}$  (para cada hora del período 23:00 – 7:00) de forma que se pueda comparar las medidas realizadas a la misma hora pero correspondientes a distintos días y eliminando la componente estacional que se pueda presentar a lo largo del año. De esta forma, la tabla 5.1.13 muestra la media y desviación típica para la serie de datos de cada hora correspondiente al año 2004 en distintas localizaciones. Asimismo, en la figura 5.1.7 se puede observar la media y el rango de variación de las series de datos correspondiente a cada una de las horas correspondientes a la localización D en el año 2002 (consultar en los anexos el resto de años y localizaciones).

|                                    | A     |                | B     |                | C     |                | D     |                | E     |                |
|------------------------------------|-------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|
| Hora                               | $\mu$ | $\sigma_{n-1}$ | $\mu$ | $\sigma_{n-1}$ | $\mu$ | $\sigma_{n-1}$ | $\mu$ | $\sigma_{n-1}$ | $\mu$ | $\sigma_{n-1}$ |
| 23 <sup>00</sup> -0 <sup>00</sup>  | 1,26  | 0,91           | 1,74  | 1,22           | 2,30  | 1,63           | 2,05  | 2,06           | 0,82  | 1,44           |
| 0 <sup>00</sup> -1 <sup>00</sup>   | 0,95  | 0,70           | 1,34  | 0,83           | 1,55  | 1,31           | 0,47  | 1,26           | 0,50  | 1,32           |
| 1 <sup>00</sup> -2 <sup>00</sup>   | 0,19  | 0,71           | 0,29  | 0,86           | 0,46  | 1,30           | -0,86 | 1,50           | -0,12 | 1,21           |
| 2 <sup>00</sup> -3 <sup>00</sup>   | -0,54 | 0,90           | -0,98 | 1,31           | -1,40 | 1,79           | -1,87 | 1,78           | -0,95 | 1,30           |
| 3 <sup>00</sup> -4 <sup>00</sup>   | -1,25 | 1,17           | -1,73 | 1,60           | -2,45 | 2,04           | -3,19 | 2,27           | -1,35 | 1,46           |
| 4 <sup>00</sup> -5 <sup>00</sup>   | -1,89 | 1,38           | -2,60 | 1,78           | -3,63 | 2,03           | -2,76 | 1,91           | -1,44 | 1,50           |
| 5 <sup>00</sup> -6 <sup>00</sup>   | -1,51 | 0,78           | -2,10 | 1,04           | -2,91 | 1,72           | -0,92 | 1,51           | -1,22 | 1,50           |
| 6 <sup>00</sup> -7 <sup>00</sup>   | 0,73  | 1,27           | 0,41  | 1,72           | 0,04  | 2,14           | 1,63  | 2,35           | 1,02  | 1,99           |
| 7 <sup>00</sup> -8 <sup>00</sup>   | -0,72 | 0,96           | -1,70 | 0,91           | -2,13 | 1,26           | -1,42 | 1,16           | 0,37  | 2,64           |
| 8 <sup>00</sup> -9 <sup>00</sup>   | -0,18 | 1,22           | -0,80 | 1,26           | -0,73 | 1,80           | -0,27 | 1,15           | 0,45  | 2,70           |
| 9 <sup>00</sup> -10 <sup>00</sup>  | 0,49  | 1,35           | -0,11 | 1,06           | -0,12 | 1,39           | 0,20  | 0,87           | -0,11 | 2,72           |
| 10 <sup>00</sup> -11 <sup>00</sup> | 0,23  | 1,04           | 0,05  | 0,78           | 0,14  | 1,11           | 0,10  | 0,90           | -1,56 | 2,56           |
| 11 <sup>00</sup> -12 <sup>00</sup> | 0,25  | 0,90           | 0,35  | 0,78           | 0,52  | 1,27           | 0,24  | 0,81           | -1,72 | 2,26           |
| 12 <sup>00</sup> -13 <sup>00</sup> | 0,17  | 1,14           | 0,53  | 0,80           | 0,58  | 1,06           | 0,19  | 0,89           | -0,43 | 2,18           |
| 13 <sup>00</sup> -14 <sup>00</sup> | -0,06 | 0,87           | 0,45  | 0,68           | 0,53  | 1,18           | 0,23  | 0,91           | -0,57 | 2,35           |
| 14 <sup>00</sup> -15 <sup>00</sup> | -0,05 | 0,92           | 0,31  | 0,73           | 0,15  | 1,18           | 0,02  | 0,90           | -1,29 | 2,43           |
| 15 <sup>00</sup> -16 <sup>00</sup> | -0,57 | 0,83           | -0,47 | 0,82           | -1,00 | 1,04           | -0,42 | 0,90           | -1,70 | 2,45           |
| 16 <sup>00</sup> -17 <sup>00</sup> | -0,38 | 0,79           | -0,22 | 0,75           | -0,60 | 1,31           | -0,36 | 0,96           | -1,19 | 2,66           |
| 17 <sup>00</sup> -18 <sup>00</sup> | -0,28 | 0,94           | 0,00  | 0,76           | -0,27 | 1,23           | -0,13 | 0,99           | -0,76 | 2,57           |
| 18 <sup>00</sup> -19 <sup>00</sup> | -0,54 | 1,11           | 0,09  | 0,86           | -0,19 | 1,28           | -0,11 | 1,14           | -0,81 | 2,35           |
| 19 <sup>00</sup> -20 <sup>00</sup> | 0,10  | 0,93           | 0,53  | 0,77           | 0,60  | 0,91           | 0,20  | 1,03           | 0,58  | 1,41           |
| 20 <sup>00</sup> -21 <sup>00</sup> | 0,04  | 0,74           | 0,20  | 0,70           | 0,36  | 0,91           | 0,27  | 0,94           | 0,01  | 1,24           |
| 21 <sup>00</sup> -22 <sup>00</sup> | 0,00  | 0,71           | -0,18 | 0,63           | -0,18 | 0,87           | -0,08 | 0,98           | -0,67 | 1,34           |
| 22 <sup>00</sup> -23 <sup>00</sup> | -0,47 | 0,89           | -0,94 | 0,93           | -1,46 | 1,13           | -0,94 | 1,29           | -1,02 | 1,82           |

Tabla 5.1.13. Media ( $\mu$ ) y desviación típica ( $\sigma_{n-1}$ ) para la serie normalizada  $L_{eq,1h} - L_{periodo}$  de cada hora del año 2004. (dB)

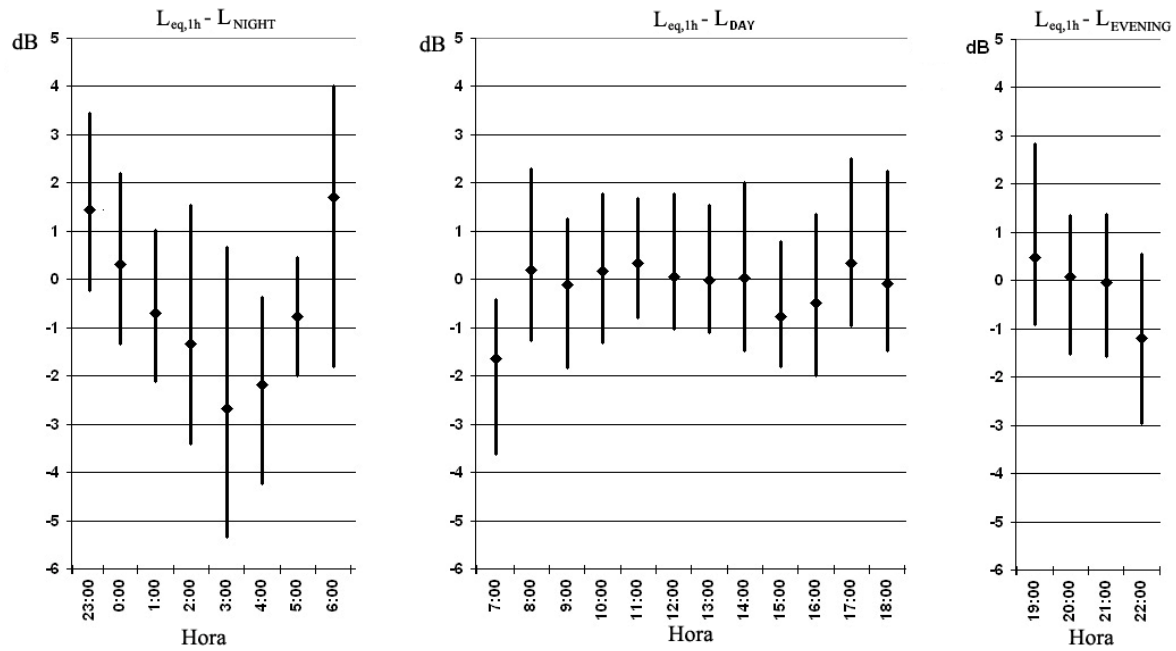


Figura 5.1.7. Media y rango de variación entre el nivel de cada hora y el correspondiente a cada periodo (DAY, EVENING y NIGHT) para el año 2002 en la localización D.

A la vista de los resultados del análisis, si se comparan las localizaciones, se observa que, en general, la media anual y la desviación típica correspondiente a diferentes horas dentro de la misma franja horaria son diferentes, variando dentro de unos márgenes. Además, si se comparan los resultados para cada localización a la misma hora los estadísticos son también diferentes. Sin embargo, aunque existen estas diferencias entre las localizaciones y entre cada una de las horas, se puede observar que los valores de la media anual y la desviación típica no presentan diferencias importantes con respecto a las encontradas en otros años, como puede observarse, a modo de ejemplo, en la tabla 5.1.14 para la localización B. De la misma forma, si en lugar de obtener las medias anuales, se determinan los estadísticos por trimestre, se llega a la misma conclusión. Si bien esta última característica no se cumple claramente en la localización E.



| Año                                | 2001  |                | 2002  |                | 2003  |                | 2004  |                | 2005  |                |
|------------------------------------|-------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|
| Hora                               | $\mu$ | $\sigma_{n-1}$ | $\mu$ | $\sigma_{n-1}$ | $\mu$ | $\sigma_{n-1}$ | $\mu$ | $\sigma_{n-1}$ | $\mu$ | $\sigma_{n-1}$ |
| 23 <sup>00</sup> -0 <sup>00</sup>  | 1,69  | 1,04           | 1,85  | 1,21           | 1,76  | 1,29           | 1,74  | 1,22           | 1,67  | 1,22           |
| 0 <sup>00</sup> -1 <sup>00</sup>   | 1,35  | 0,81           | 1,47  | 0,74           | 1,35  | 0,83           | 1,34  | 0,83           | 1,26  | 0,82           |
| 1 <sup>00</sup> -2 <sup>00</sup>   | 0,34  | 0,73           | 0,37  | 0,74           | 0,39  | 0,77           | 0,29  | 0,86           | 0,21  | 0,93           |
| 2 <sup>00</sup> -3 <sup>00</sup>   | -0,91 | 1,09           | -0,92 | 1,18           | -0,88 | 1,31           | -0,98 | 1,31           | -1,03 | 1,47           |
| 3 <sup>00</sup> -4 <sup>00</sup>   | -1,70 | 1,40           | -1,63 | 1,52           | -1,74 | 1,62           | -1,73 | 1,60           | -1,77 | 1,48           |
| 4 <sup>00</sup> -5 <sup>00</sup>   | -2,55 | 1,66           | -2,59 | 1,69           | -2,66 | 1,85           | -2,60 | 1,78           | -2,66 | 1,73           |
| 5 <sup>00</sup> -6 <sup>00</sup>   | -2,04 | 0,89           | -2,29 | 1,01           | -2,28 | 1,15           | -2,10 | 1,04           | -1,94 | 0,92           |
| 6 <sup>00</sup> -7 <sup>00</sup>   | 0,54  | 1,60           | 0,19  | 1,62           | 0,36  | 1,59           | 0,41  | 1,72           | 0,68  | 1,69           |
| 7 <sup>00</sup> -8 <sup>00</sup>   | -1,30 | 0,69           | -1,71 | 1,36           | -1,88 | 1,51           | -1,70 | 0,91           | -1,72 | 1,06           |
| 8 <sup>00</sup> -9 <sup>00</sup>   | -0,51 | 1,09           | -0,82 | 1,37           | -0,72 | 1,47           | -0,80 | 1,26           | -0,76 | 1,30           |
| 9 <sup>00</sup> -10 <sup>00</sup>  | -0,13 | 0,95           | -0,22 | 1,22           | -0,11 | 1,28           | -0,11 | 1,06           | -0,13 | 1,17           |
| 10 <sup>00</sup> -11 <sup>00</sup> | 0,05  | 0,92           | -0,05 | 1,02           | -0,08 | 1,13           | 0,05  | 0,78           | -0,01 | 0,94           |
| 11 <sup>00</sup> -12 <sup>00</sup> | 0,26  | 0,74           | 0,29  | 1,09           | 0,20  | 1,04           | 0,35  | 0,78           | 0,30  | 0,83           |
| 12 <sup>00</sup> -13 <sup>00</sup> | 0,47  | 0,72           | 0,40  | 1,07           | 0,53  | 1,05           | 0,53  | 0,80           | 0,57  | 0,90           |
| 13 <sup>00</sup> -14 <sup>00</sup> | 0,50  | 0,67           | 0,45  | 1,19           | 0,56  | 1,01           | 0,45  | 0,68           | 0,49  | 0,85           |
| 14 <sup>00</sup> -15 <sup>00</sup> | 0,23  | 0,68           | 0,03  | 1,27           | 0,18  | 1,31           | 0,31  | 0,73           | 0,42  | 0,85           |
| 15 <sup>00</sup> -16 <sup>00</sup> | -0,39 | 0,61           | -0,36 | 1,13           | -0,43 | 0,99           | -0,47 | 0,82           | -0,47 | 0,79           |
| 16 <sup>00</sup> -17 <sup>00</sup> | -0,25 | 0,64           | -0,18 | 1,25           | -0,26 | 0,96           | -0,22 | 0,75           | -0,41 | 0,81           |
| 17 <sup>00</sup> -18 <sup>00</sup> | 0,00  | 0,62           | 0,02  | 1,32           | -0,09 | 1,23           | 0,00  | 0,76           | -0,14 | 0,90           |
| 18 <sup>00</sup> -19 <sup>00</sup> | -0,01 | 0,81           | -0,13 | 1,34           | -0,15 | 1,40           | 0,09  | 0,86           | 0,12  | 0,98           |
| 19 <sup>00</sup> -20 <sup>00</sup> | 0,41  | 0,76           | 0,36  | 0,65           | 0,44  | 0,70           | 0,53  | 0,77           | 0,56  | 0,78           |
| 20 <sup>00</sup> -21 <sup>00</sup> | 0,07  | 0,61           | 0,18  | 0,60           | 0,18  | 0,68           | 0,20  | 0,70           | 0,27  | 0,75           |
| 21 <sup>00</sup> -22 <sup>00</sup> | -0,10 | 0,63           | -0,09 | 0,58           | -0,12 | 0,67           | -0,18 | 0,63           | -0,22 | 0,82           |
| 22 <sup>00</sup> -23 <sup>00</sup> | -0,69 | 0,87           | -0,71 | 0,76           | -0,85 | 0,93           | -0,94 | 0,93           | -1,08 | 0,93           |

Tabla 5.1.14. Media anual ( $\mu$ ) y desviación típica ( $\sigma_{n-1}$ ) para la serie de datos  $L_{eq.1h} - L_{periodo}$  de cada hora y distintos años para la localización B. (dB)

Si se toma como referencia los valores medios, para la franja horaria correspondiente al periodo DAY, se observa que las horas correspondientes al inicio y final del periodo horario son las que presentan las mayores diferencias con respecto al nivel  $L_{DAY}$ , con lo que tomar la medida de esas horas como estimadores implicaría un mayor error y por tanto deberían de evitarse. Para el período NIGHT, las horas con mayores diferencias se corresponden con la primera hora de la franja (sobrestimación) y las horas centrales (subestimación), mientras que para el período EVENING la peor de las horas es la última hora de dicha franja horaria.

En general, para todas las localizaciones (excluyendo la localización E), el período NIGHT presenta las mayores diferencias entre las horas, con un error entre 3 y 5 dB, mientras que el período EVENING tiene la menor variación, entre 0,5 y 2 dB, y para el período DAY el margen de variación oscila entre 1 y 3 dB. Resultados que se resumen en la tabla 5.1.15 indicando también el rango de variación de la desviación típica. No obstante, se debe mencionar que estos márgenes se reducen considerablemente si las horas con peores predicciones (mencionadas anteriormente) son excluidas de cada franja horaria.

|  | A           | B           | C           | D           | E           |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Rango variación media</b>             |             |             |             |             |             |
| <b>DAY</b>                               | [-0,7; 0,4] | [-1,7; 0,5] | [-2,3; 0,6] | [-1,5; 0,3] | [-1,7; 0,3] |
| <b>EVENING</b>                           | [-0,4; 0,1] | [-1,0; 0,5] | [-1,4; 0,6] | [-1,0; 0,3] | [-1,2; 0,6] |
| <b>NIGHT</b>                             | [-1,9; 1,1] | [-2,6; 1,7] | [-3,6; 2,3] | [-3,0; 1,8] | [-1,5; 1,0] |
| <b>Rango variación desviación típica</b> |             |             |             |             |             |
| <b>DAY</b>                               | [0,8; 1,3]  | [0,8; 1,3]  | [1,0; 1,7]  | [0,9; 1,2]  | [2,0; 3,0]  |
| <b>EVENING</b>                           | [0,6; 0,9]  | [0,7; 0,9]  | [0,9; 1,3]  | [0,8; 1,3]  | [1,2; 1,8]  |
| <b>NIGHT</b>                             | [0,6; 1,3]  | [0,8; 1,7]  | [1,0; 2,0]  | [1,3; 2,3]  | [1,1; 1,8]  |

Tabla 5.1.15. Margen de variación entre cada una de las horas de la franja horaria para el valor medio y la desviación típica de las series,  $Leq_{1hour} - L_{DAY}$ ,  $Leq_{1hour} - L_{EVENING}$  y  $Leq_{1hour} - L_{NIGHT}$ , en todas las localizaciones. (dB)

A pesar de existir diferencias entre cada una de las horas y entre cada una de las estaciones y con el objetivo de establecer los errores que se cometen cuando se miden un número de horas inferiores a los correspondientes a la franja horaria, se ha procedido a realizar un muestreo aleatorio para cada año que contenga los errores entre los niveles equivalentes correspondientes a un determinado número de horas y el nivel de la franja horaria donde son extraídas las horas de medición. De esta forma se obtendrá el error promedio cometido en función del número de horas que se toman como medición. Para el nivel  $L_{DAY}$  se han tomado muestras desde 1 hora hasta 8 horas. Para el nivel  $L_{NIGHT}$

de 1 a 6 horas y para el nivel  $L_{EVENING}$  de 1 a 3 horas. El procedimiento seguido consistía en seleccionar un día aleatorio dentro del año y dentro de ese día se seleccionaba una o más horas de forma aleatoria dentro de la franja horaria a evaluar, calculando el nivel equivalente correspondiente a esas horas y analizando el error cometido con el nivel correspondiente a toda la franja. La otra alternativa realizada consiste en que en lugar de tomar las horas de forma aleatoria dentro de la franja horaria, se establecía una hora de inicio (de forma aleatoria) y se tomaban las medidas de horas en continuo, calculando el nivel equivalente para esas horas y comparándolo con el correspondiente a la franja. De esta forma, la tabla 5.1.16 resume los resultados encontrados cuando se toma 1 hora de medición en las predicción de cada uno de los niveles sonoros y para cada una de las localizaciones, mientras que las tablas 5.1.17 y 5.1.18 muestran el porcentaje de muestras dentro de la banda del error  $\pm 1$  dB y  $\pm 2$  dB para la estrategia de horas continuas y horas aleatorias respectivamente.

|                                       | A             | B             | C             | D             | E             |
|---------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| <b>Nivel <math>L_{DAY}</math></b>     |               |               |               |               |               |
| <b>Media</b>                          | -0,12         | -0,15         | -0,39         | -0,14         | -0,77         |
| <b>Desviación Típica</b>              | 1,07          | 1,23          | 1,97          | 1,13          | 2,62          |
| <b>Prob. [-1; +1] dB</b>              | 78%           | 74%           | 57%           | 74%           | 32%           |
| <b>Prob. [-2; +2] dB</b>              | 96%           | 93%           | 81%           | 92%           | 56%           |
| <b>Banda 95%</b>                      | [-1,94; 2,01] | [-2,69; 1,83] | [-4,04; 3,13] | [-2,44; 2,34] | [-6,31; 4,14] |
| <b>Nivel <math>L_{EVENING}</math></b> |               |               |               |               |               |
| <b>Media</b>                          | -0,08         | -0,06         | -0,21         | -0,21         | -0,32         |
| <b>Desviación Típica</b>              | 0,71          | 0,89          | 1,31          | 1,20          | 1,67          |
| <b>Prob. [-1; +1] dB</b>              | 87%           | 77%           | 62%           | 73%           | 58%           |
| <b>Prob. [-2; +2] dB</b>              | 99%           | 97%           | 88%           | 94%           | 83%           |
| <b>Banda 95%</b>                      | [-1,50; 1,29] | [-1,95; 1,60] | [-2,86; 2,27] | [-2,37; 1,92] | [-4,33; 2,92] |
| <b>Nivel <math>L_{NIGHT}</math></b>   |               |               |               |               |               |
| <b>Media</b>                          | -0,34         | -0,48         | -0,72         | -0,55         | -0,34         |
| <b>Desviación Típica</b>              | 2,54          | 2,00          | 2,51          | 2,44          | 1,72          |
| <b>Prob. [-1; +1] dB</b>              | 45%           | 35%           | 27%           | 34%           | 45%           |
| <b>Prob. [-2; +2] dB</b>              | 78%           | 64%           | 54%           | 58%           | 79%           |
| <b>Banda 95%</b>                      | [-3,47; 2,50] | [-4,35; 2,92] | [-5,62; 3,62] | [-5,15; 3,78] | [-3,36; 2,99] |

Tabla 5.1.16. Estadísticas del error en base a una hora de medición en cada una de las localizaciones considerando todos los años. (dB)

|                                 | A                  |                    | B                  |                    | C                  |                    | D                  |                    | E                  |                    |
|---------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|                                 | Prob.<br>$\pm 1dB$ | Prob.<br>$\pm 2dB$ | Prob.<br>$\pm 1dB$ | Prob.<br>$\pm 2dB$ | Prob.<br>$\pm 1dB$ | Prob.<br>$\pm 2dB$ | Prob.<br>$\pm 1dB$ | Prob.<br>$\pm 2dB$ | Prob.<br>$\pm 1dB$ | Prob.<br>$\pm 2dB$ |
| <b><math>L_{DAY}</math></b>     |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| <b>1 hora</b>                   | 78%                | 95%                | 74%                | 93%                | 57%                | 81%                | 74%                | 92%                | 32%                | 56%                |
| <b>2 horas</b>                  | 83%                | 96%                | 82%                | 96%                | 66%                | 88%                | 80%                | 95%                | 35%                | 66%                |
| <b>3 horas</b>                  | 87%                | 98%                | 89%                | 98%                | 73%                | 92%                | 85%                | 97%                | 41%                | 69%                |
| <b>4 horas</b>                  | 90%                | 99%                | 92%                | 99%                | 77%                | 95%                | 90%                | 98%                | 46%                | 75%                |
| <b>5 horas</b>                  | 94%                | 99%                | 95%                | 99%                | 84%                | 96%                | 93%                | 99%                | 53%                | 82%                |
| <b>6 horas</b>                  | 95%                | 99%                | 97%                | 100%               | 89%                | 97%                | 94%                | 99%                | 60%                | 87%                |
| <b>7 horas</b>                  | 97%                | 100%               | 98%                | 100%               | 94%                | 99%                | 97%                | 100%               | 68%                | 91%                |
| <b>8 horas</b>                  | 99%                | 100%               | 99%                | 100%               | 96%                | 100%               | 98%                | 100%               | 77%                | 95%                |
| <b><math>L_{EVENING}</math></b> |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| <b>1 hora</b>                   | 87%                | 99%                | 77%                | 97%                | 62%                | 88%                | 73%                | 94%                | 58%                | 83%                |
| <b>2 horas</b>                  | 96%                | 99%                | 91%                | 99%                | 82%                | 97%                | 90%                | 98%                | 76%                | 92%                |
| <b>3 horas</b>                  | 100%               | 100%               | 99%                | 100%               | 96%                | 99%                | 97%                | 99%                | 91%                | 98%                |
| <b><math>L_{NIGHT}</math></b>   |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| <b>1 hora</b>                   | 45%                | 78%                | 35%                | 64%                | 27%                | 54%                | 34%                | 58%                | 45%                | 79%                |
| <b>2 horas</b>                  | 58%                | 83%                | 44%                | 73%                | 32%                | 61%                | 35%                | 68%                | 53%                | 87%                |
| <b>3 horas</b>                  | 63%                | 87%                | 50%                | 80%                | 34%                | 68%                | 47%                | 71%                | 60%                | 91%                |
| <b>4 horas</b>                  | 74%                | 93%                | 57%                | 86%                | 39%                | 77%                | 54%                | 77%                | 70%                | 95%                |
| <b>5 horas</b>                  | 80%                | 99%                | 67%                | 93%                | 55%                | 85%                | 59%                | 85%                | 81%                | 97%                |
| <b>6 horas</b>                  | 92%                | 100%               | 80%                | 99%                | 68%                | 98%                | 71%                | 96%                | 91%                | 99%                |

Tabla 5.1.17. Porcentaje de muestras con un margen de error  $\pm 1$  dB y  $\pm 2$  dB para la estimación de los niveles sonoros diarios  $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$  y  $L_{NIGHT}$  a partir de mediciones en continuo de un determinado número de horas.

Al análisis de los datos, se observa que los mismos son similares para todas las localizaciones salvo para la localización E que no está afectada por el ruido de tráfico. Por lo que, excluyendo esta localización, y tomando como referencia una hora de medición en cualquier franja horaria, se puede indicar que para el nivel  $L_{DAY}$  dicha medida sería significativa considerando un margen de error de  $\pm 2$  dB (prob.>90%), pues el porcentaje de muestras obtenido dentro del margen  $\pm 1$  dB está en torno al 70%-75%; no obstante, esta probabilidad sería mayor si se hubiera excluido del muestreo la primera y última hora de la franja. Si la precisión deseada es de  $\pm 1$  dB, se debe tomar

una estrategia de 4 horas de medición en continuo, mientras que para la estrategia de tomar horas aleatorias sería recomendable tomar 3 horas.

Para el nivel  $L_{EVENING}$  tendríamos resultados similares que los encontrados para el nivel  $L_{DAY}$ , pero ligeramente mejores en las estimaciones basadas en 1 hora de medición, mientras que sería recomendable tomar 2 horas de medición tanto de forma continua como de forma aleatoria para obtener un margen de error  $\pm 1$  dB.

|                                 | <b>A</b>            |                     | <b>B</b>            |                     | <b>C</b>            |                     | <b>D</b>            |                     | <b>E</b>            |                     |
|---------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                                 | Prob.<br>$\pm 1$ dB | Prob.<br>$\pm 2$ dB | Prob.<br>$\pm 1$ dB | Prob.<br>$\pm 2$ dB | Prob.<br>$\pm 1$ dB | Prob.<br>$\pm 2$ dB | Prob.<br>$\pm 1$ dB | Prob.<br>$\pm 2$ dB | Prob.<br>$\pm 1$ dB | Prob.<br>$\pm 2$ dB |
| <b><math>L_{DAY}</math></b>     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| <b>2 horas</b>                  | 87%                 | 97%                 | 87%                 | 98%                 | 70%                 | 91%                 | 82%                 | 95%                 | 47%                 | 76%                 |
| <b>3 horas</b>                  | 92%                 | 99%                 | 93%                 | 98%                 | 77%                 | 94%                 | 89%                 | 98%                 | 57%                 | 84%                 |
| <b>4 horas</b>                  | 94%                 | 99%                 | 96%                 | 99%                 | 83%                 | 96%                 | 92%                 | 99%                 | 66%                 | 91%                 |
| <b>5 horas</b>                  | 97%                 | 99%                 | 97%                 | 99%                 | 88%                 | 97%                 | 95%                 | 99%                 | 72%                 | 93%                 |
| <b>6 horas</b>                  | 98%                 | 100%                | 98%                 | 100%                | 91%                 | 98%                 | 95%                 | 99%                 | 80%                 | 96%                 |
| <b>7 horas</b>                  | 99%                 | 100%                | 99%                 | 100%                | 93%                 | 99%                 | 97%                 | 99%                 | 86%                 | 98%                 |
| <b>8 horas</b>                  | 99%                 | 100%                | 99%                 | 100%                | 96%                 | 99%                 | 98%                 | 100%                | 90%                 | 98%                 |
| <b><math>L_{EVENING}</math></b> |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| <b>2 horas</b>                  | 97%                 | 100%                | 95%                 | 100%                | 85%                 | 98%                 | 91%                 | 98%                 | 80%                 | 95%                 |
| <b>3 horas</b>                  | 99%                 | 100%                | 100%                | 100%                | 97%                 | 99%                 | 97%                 | 99%                 | 94%                 | 99%                 |
| <b><math>L_{NIGHT}</math></b>   |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| <b>2 horas</b>                  | 72%                 | 92%                 | 61%                 | 86%                 | 49%                 | 78%                 | 46%                 | 77%                 | 64%                 | 91%                 |
| <b>3 horas</b>                  | 82%                 | 97%                 | 74%                 | 94%                 | 61%                 | 89%                 | 61%                 | 86%                 | 77%                 | 96%                 |
| <b>4 horas</b>                  | 91%                 | 99%                 | 85%                 | 98%                 | 74%                 | 95%                 | 70%                 | 93%                 | 88%                 | 98%                 |
| <b>5 horas</b>                  | 96%                 | 100%                | 90%                 | 99%                 | 84%                 | 98%                 | 81%                 | 97%                 | 92%                 | 99%                 |
| <b>6 horas</b>                  | 99%                 | 100%                | 97%                 | 100%                | 94%                 | 99%                 | 88%                 | 97%                 | 97%                 | 99%                 |

Tabla 5.1.18. Porcentaje de muestras con un margen de error  $\pm 1$  dB y  $\pm 2$  dB para la estimación de los niveles sonoros diarios  $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$  y  $L_{NIGHT}$  a partir de mediciones de un determinado número de horas aleatorias.

Por contra para el nivel  $L_{NIGHT}$  los resultados son dispares en función de la localización considerada, no pudiendo establecer similitudes, pues los márgenes de probabilidad difieren entre unas estaciones y otras y también en función del número de horas tomadas como predicción (hasta un margen de diferencia entre 20%-25%). Si bien, de forma

aproximada, para las estimaciones en base a una hora de medición se obtiene un margen de error de  $\pm 3$  dB y  $\pm 4$  dB dependiendo de la localización, mientras que para el margen de error de  $\pm 2$  dB se deben tomar entre 5 y 6 horas de medición en continuo y entre 2 y 3 horas para la estrategia de horas aleatorias.

Para la localización E, se observa que son más fiables las predicciones en horario nocturno que en horario diurno (en contraposición a los resultados encontrados en las locaciones de ámbito urbano). De esta forma para el nivel  $L_{NIGHT}$  se recomendaría tomar 3 horas de medición en continuo para un margen de error de  $\pm 2$  dB; 2 horas para el nivel  $L_{EVENING}$ , y por el contrario se debería tomar hasta 4 horas para el nivel  $L_{DAY}$  para un margen de error  $\pm 3$  dB.

Para la estimación del nivel sonoro  $L_{DEN}$  a partir de mediciones de una hora de duración, el procedimiento seguido fue el siguiente:

- Para cada una de las muestras tomadas en un año (para cada localización se tomaron 1000 muestras por año, lo que hace un total de 5000 muestras), se selecciona de forma aleatoria un día y, para ese día, se selecciona, también de forma aleatoria, una hora dentro de cada una de las franjas horarias, obteniendo el nivel sonoro equivalente de cada una de las horas seleccionadas (una hora dentro del período diurno, otra hora dentro del período de tarde y otra hora dentro del período nocturno, obteniendo un total de tres niveles sonoros). En base a esos tres valores el nivel  $L_{DEN}$  es calculado considerando cada uno de los niveles equivalentes de una hora,  $L_{eq,1h}$  dentro de cada franja horaria como los valores  $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$  y  $L_{NIGHT}$

de la fórmula que permite obtener el nivel  $L_{DEN}$ . Por último, se analiza el error cometido en esta predicción al compararlo con el valor real del nivel  $L_{DEN}$  correspondiente al día donde fueron extraídas las horas de forma aleatoria..

Los resultados estadísticos de la distribución del error obtenidos a partir de esta estrategia y para cada localización, se resumen en la tabla 5.1.19, mientras que en la figura 5.1.8 se muestra las funciones de distribución del error cometido para cada una de las localizaciones. Se observa que las diferencias en el valor medio son pequeñas, y que para la dispersión del error y los márgenes de confianza, si se excluyen los resultados de la localización E, no presentan diferencias significativas. De esta forma, se podría establecer como referencia un margen de  $\pm 2$  dB para el error cometido (asumiendo una probabilidad del 90%).

| Localización             | A             | B             | C             | D             | E             |
|--------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| <b>Media</b>             | -0,10         | -0,10         | -0,23         | -0,22         | -0,23         |
| <b>Desviación Típica</b> | 0,98          | 1,10          | 1,47          | 1,35          | 1,54          |
| <b>Prob. [-1;+1] dB</b>  | 67,4%         | 61,4%         | 54,9%         | 55,3%         | 56,3%         |
| <b>Prob. [-2;+2] dB</b>  | 97,5%         | 95,3%         | 89,0%         | 89,8%         | 86,9%         |
| <b>Banda 95%</b>         | [-1,87; 1,62] | [-2,04; 1,91] | [-2,78; 2,35] | [-2,38; 2,39] | [-3,05; 2,75] |

Tabla 5.1.19. Estadísticos del error en la estimación del nivel diario  $L_{DEN}$  en base a la medición de una hora dentro de cada franja horaria. (dB)

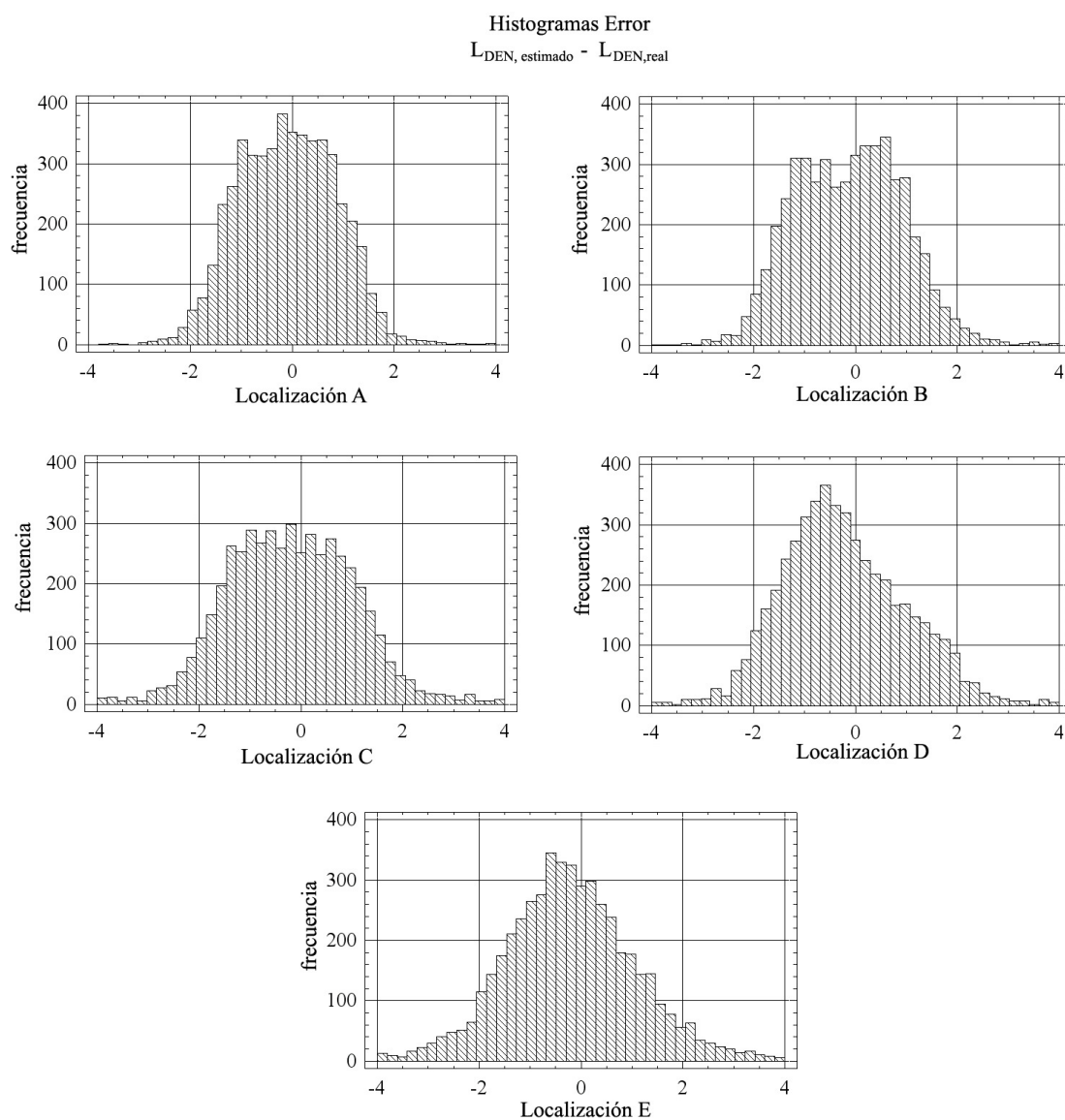


Figura 5.1.8. Histogramas del error cometido en la estimación del nivel diario  $L_{DEN}$  en base a la medición de una hora dentro de cada franja horaria para cada una de las localizaciones.



Como último análisis dentro de las estimaciones en base a medidas de corta duración, se desea relacionar el error cometido a partir de mediciones de una hora de duración al estimar niveles equivalentes a períodos que contemplen un determinado número de días. Con el objetivo de relacionar medidas de corta duración para estimaciones de períodos de duración media. En particular, se ha estudiado el error cometido al tomar una hora de medición con relación al nivel sonoro promedio de los siguientes 7, 14 y 28 días (tres períodos de estimación distintos) correspondiente a la franja horaria donde es tomada la muestra. La selección de la muestra, tanto para la selección del día y de la hora se realizará de forma aleatoria. En este caso el procedimiento seguido es similar a los anteriores pero variando en el cálculo del promedio del período a estimar:

- Para cada muestra tomada, y para cada nivel sonoro, se selecciona, de forma aleatoria un día dentro de los 365 días del año. Una vez seleccionado el día, se toma una hora, de forma aleatoria dentro de la franja horaria correspondiente al nivel sonoro evaluado. Al mismo tiempo se calcula el valor medio del nivel sonoro correspondiente a la franja de donde es extraída la hora correspondiente a tres períodos distintos: el promedio del nivel sonoro de los 7 días siguientes al día seleccionado, el promedio del nivel sonoro de los 14 días siguientes y el promedio del nivel sonoro de los 28 días siguientes, contando en estos períodos como primer día el correspondiente al día seleccionado de forma aleatoria. Una vez se han calculado estos niveles, se determina la diferencia entre el nivel de la hora seleccionada y cada uno de los niveles promedios calculados, de forma que se obtiene para cada período de evaluación (7, 14 y 28 días) el error cometido por la medida de una hora.

A partir de los resultados mostrados en la tabla 5.1.20, para la localización A (consultar en anexos el resto de localizaciones), se observa que las estadísticas del error para cada uno de los períodos evaluados (7, 14 y 28 días) son muy similares.

|  | Período de Estimación |               |             |           |               |             |           |               |             |
|--|-----------------------|---------------|-------------|-----------|---------------|-------------|-----------|---------------|-------------|
|  | 7 Días                |               |             | 14 Días   |               |             | 28 Días   |               |             |
|  | $L_{DAY}$             | $L_{EVENING}$ | $L_{NIGHT}$ | $L_{DAY}$ | $L_{EVENING}$ | $L_{NIGHT}$ | $L_{DAY}$ | $L_{EVENING}$ | $L_{NIGHT}$ |
|  | Media                 | Desviación    | Típica      | Prob.     | ±1 dB         | Prob.       | ±2 dB     | Prob.         | ±2 dB       |
|  | -0,12                 | -0,04         | -0,29       | -0,12     | -0,04         | -0,29       | -0,14     | -0,04         | -0,32       |
|  | 1,51                  | 1,09          | 2,41        | 1,55      | 1,14          | 2,44        | 1,56      | 1,17          | 2,47        |
|  | 59%                   | 75%           | 39%         | 58%       | 73%           | 39%         | 58%       | 71%           | 38%         |
|  | 84%                   | 95%           | 71%         | 83%       | 94%           | 69%         | 83%       | 94%           | 69%         |

Tabla 5.1.20. Estadística del error cometido en la estimación de períodos de 7, 14 y 28 días a partir de medidas de una hora de duración en la localización A. (dB)

Esto es debido a que las medias de los períodos de 7, 14 y 28 días son muy parecidas para los mismos períodos de tiempo a lo largo del año (tener en cuenta que el promedio de 28 días incluye los 14 días (y los 7 días) que se utilizaron para calcular el promedio de un período menor, y lo mismo para el período de 14 días que incluye en su calculo los 7 días utilizados en el calculo del promedio de 7 días). Es decir, el valor medio del nivel sonoro correspondiente al período desde el 1 de marzo hasta el 7 de marzo (7 días), no presenta importantes variaciones respecto al valor medio correspondiente al período del 1 de marzo al 14 de marzo (14 días) y tampoco con el valor medio del período que va desde el 1 de marzo al 28 de marzo (28 días). Teniendo en cuenta esta consideración, los resultados del error cometido, para cada nivel sonoro, correspondientes a la estimación de períodos de 28 días a partir de medidas de una hora de duración pueden usarse como referencia para los otros períodos al presentar,

ligeramente, peores resultados. De esta forma en la tabla 5.1.21 se muestran los resultados si se aplica la misma metodología pero correspondiente a los días laborables.

|                                 | <b>Error Medio</b> | <b>Desviación Típica</b> | <b>Probabilidad [-1; +1] dB</b> | <b>Probabilidad [-2; +2] dB</b> | <b>Banda 95%</b> |
|---------------------------------|--------------------|--------------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------------|
| <b><math>L_{DAY}</math></b>     |                    |                          |                                 |                                 |                  |
| <b>A</b>                        | -0,16              | 1,17                     | 74%                             | 93%                             | [-2,1; 2,7]      |
| <b>B</b>                        | -0,11              | 1,15                     | 71%                             | 93%                             | [-2,3; 2,3]      |
| <b>C</b>                        | -0,43              | 2,31                     | 50%                             | 76%                             | [-5,3; 4,5]      |
| <b>D</b>                        | -0,11              | 1,12                     | 69%                             | 93%                             | [-2,0; 2,6]      |
| <b>E</b>                        | -0,77              | 2,94                     | 24%                             | 47%                             | [-5,1; 5,9]      |
| <b><math>L_{EVENING}</math></b> |                    |                          |                                 |                                 |                  |
| <b>A</b>                        | -0,08              | 1,08                     | 75%                             | 95%                             | [-1,8; 2,1]      |
| <b>B</b>                        | -0,08              | 1,20                     | 63%                             | 91%                             | [-2,3; 2,5]      |
| <b>C</b>                        | -0,22              | 1,56                     | 53%                             | 80%                             | [-3,0; 3,5]      |
| <b>D</b>                        | -0,13              | 1,34                     | 66%                             | 90%                             | [-2,4; 2,9]      |
| <b>E</b>                        | -0,21              | 2,00                     | 42%                             | 76%                             | [-3,3; 4,5]      |
| <b><math>L_{NIGHT}</math></b>   |                    |                          |                                 |                                 |                  |
| <b>A</b>                        | -0,42              | 2,01                     | 32%                             | 65%                             | [-4,1; 2,8]      |
| <b>B</b>                        | -0,57              | 2,64                     | 23%                             | 50%                             | [-5,2; 4,0]      |
| <b>C</b>                        | -0,94              | 3,05                     | 23%                             | 43%                             | [-6,6; 4,2]      |
| <b>D</b>                        | -0,76              | 2,73                     | 21%                             | 44%                             | [-5,5; 4,0]      |
| <b>E</b>                        | -0,32              | 2,27                     | 36%                             | 65%                             | [-4,0; 4,5]      |

Tabla 5.1.21. Estadísticos del error correspondientes a la estimación de la media del nivel sonoro correspondiente a 28 días laborables a partir de medidas de una hora de duración.(dB)

Al realizar la comparación entre localizaciones, se observa que existen diferencias importantes para C y E con respecto al resto de localizaciones, debido fundamentalmente a la variabilidad que presentan los datos. Sin embargo, si se tiene en cuenta la posibilidad de excluir los fines de semana y festivos del análisis, las conclusiones obtenidas son similares a las del apartado anterior (5.1.3), donde las estimaciones correspondientes a días laborables presentan menor error que no contemplando todos los días.

No obstante, se puede establecer un margen de error de  $\pm 2$  dB (probabilidad  $> 90\%$ ) para la estimación de los niveles  $L_{DAY}$  y  $L_{EVENING}$  correspondiente a días laborables y  $\pm 3$  dB para la localización C, siendo aún superior el margen para la localización E. Mientras que por el contrario, para el nivel  $L_{NIGHT}$ , es más difícil establecer un margen de confianza común a todas las localizaciones, debiéndose no recomendar la medida de una hora como predicción, ya que los márgenes de variación del error cometido están entre  $-4$  dB y  $+3$  dB para el mejor resultado y entre  $-6$  dB y  $+4,5$  dB para las localizaciones con peores predicciones.



## 5.2 AJUSTE ESTADÍSTICO DE LOS NIVELES SONOROS

### 5.2.1 INTRODUCCIÓN

Los niveles equivalentes de una hora,  $L_{Aeq,1h}$ , correspondientes a una hora determinada dentro de las 24 horas del día son, en general, distintos para cada una de las 24 horas del día, como puede observarse a partir de la figura 5.2.1 correspondiente a las medidas en un día concreto en la localización A.

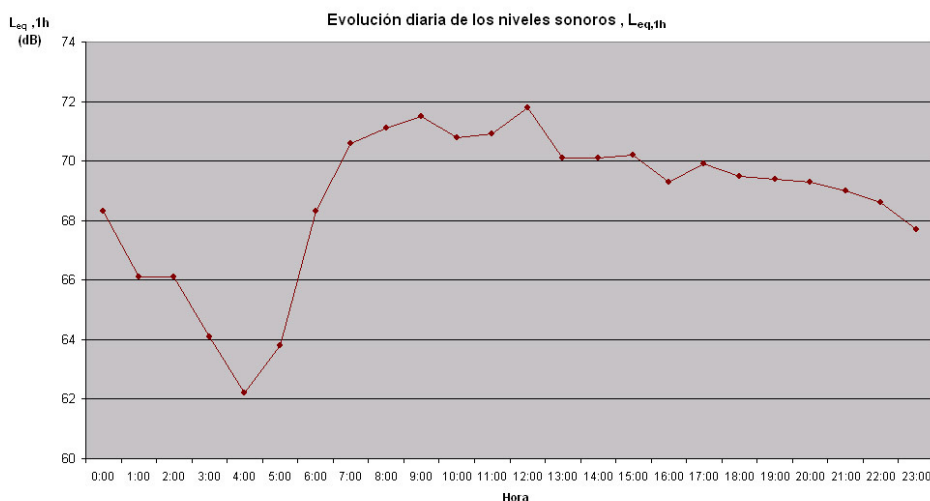


Figura 5.2.1. Valor del nivel sonoro  $L_{Aeq,1h}$  el 18 junio de 2001 en la localización A.

De la misma forma, también se observa que esta tendencia de los niveles sonoros de una hora a lo largo del día se repite todos los días a lo largo del año, (como puede observarse a partir de la figura 5.2.2 al comparar la evolución del nivel  $L_{eq,1h}$  para distintos días en el año 2001), siendo esta tendencia la misma para otros años. No obstante, y teniendo en cuenta que el nivel sonoro diario,  $L_{eq,24h}$ , puede verse modificado respecto de unos días a otros a lo largo del año (por ejemplo debido a las vacaciones de verano, festivos, los fines de semana, etc.), este patrón sonoro diario (o huella sonora) puede presentar diferencias en los valores medios al comparar unos días

u otros . Es por ello que si se comparara el nivel sonoro a una hora determinada en un día en particular con el correspondiente a la misma hora pero correspondiente a otro día, se debería tener en cuenta que va a estar afectado por la diferencia en los niveles sonoros diarios de cada día, por lo que, para poder comparar estas dos medidas y analizar sus diferencias se debe sustraer a cada valor el valor medio correspondiente a nivel sonoro de la franja horaria (o bien del día) donde fue extraída la hora.

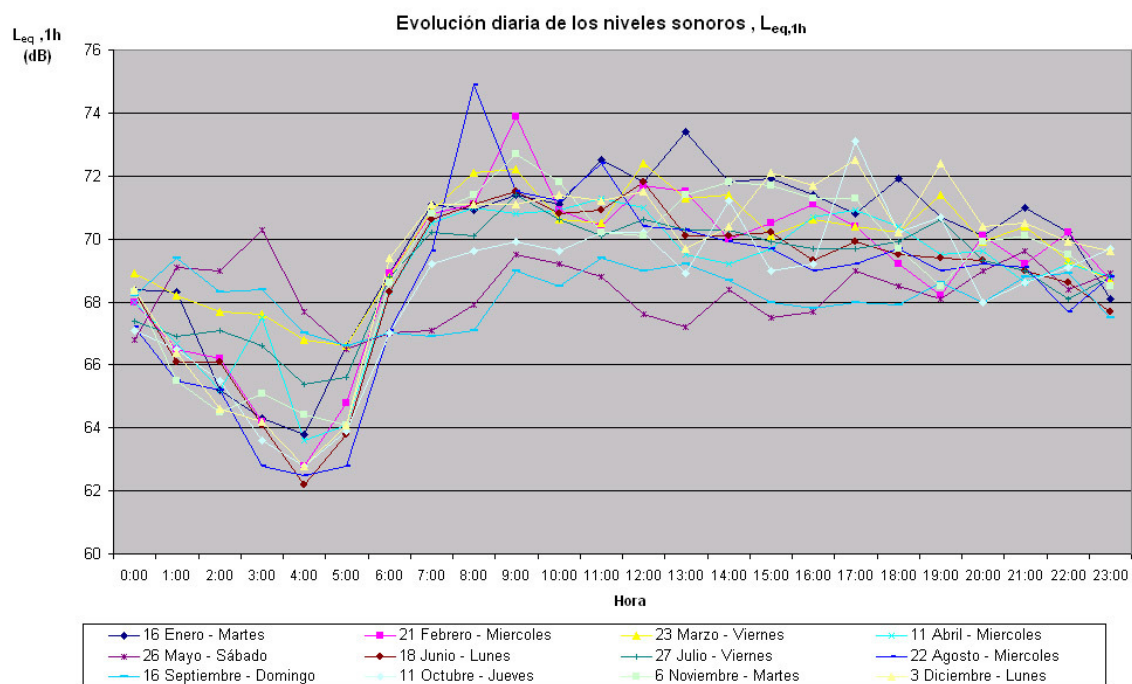


Figura 5.2.2. Evolución diaria de los niveles sonoros  $L_{eq,1h}$  correspondientes a distintos días en la localización A (año 2001).

Procediendo de esta forma con los datos de todos los niveles sonoros de una hora  $L_{eq,1h}$ , correspondientes a una hora en particular, a lo largo de un año (o más años), se observa que se acumulan en torno a un valor medio que determinará la diferencia entre el nivel sonoro obtenido al medir en esa hora en particular y la correspondiente a la franja horaria (o al día) a la cual pertenece esa hora. Asimismo, también se puede analizar la

variabilidad que presentan dichas medidas, así como el posible análisis de la distribución estadística que puedan presentar los datos, pudiendo extender este análisis a cada una de las 24 horas del día.

Si se centrara el análisis en la posible distribución estadística de los datos, el ajuste estadístico de la diferencia entre los niveles sonoros de cada hora respecto del nivel sonoro de la franja horaria a la que pertenece la hora permitiría obtener la probabilidad del error en la estimación de los niveles sonoros de la franja horaria a partir de la medida a una hora determinada. De la misma forma, también se podría determinar, conocida la distribución estadística, si la medida realizada a una hora determinada puede considerarse (o no) como un valor anómalo.

A pesar de estas observaciones, el ajuste estadístico correspondiente a niveles sonoros ha sido objeto de análisis por diferentes autores. Se debe mencionar que la variabilidad de los niveles sonoros en base a una hora de medición,  $L_{eq,1h}$ , a lo largo de las 24 horas del día ha sido observado en varios estudios [18, 23, 37 – 40], describiéndose, en algunos casos, las estadísticas simples de dicho comportamiento. Malchaire [28] encuentra que para los niveles percentiles horarios, existen diferencias significativas entre las medidas de una hora en concreto respecto de otra (para el mismo día), lo que a efectos de estimar niveles de mayor duración, el error cometido dependerá de la hora donde se efectúe la medida. En este punto, Brambilla [30] en un análisis más detallado, establece unos patrones normalizados para los niveles sonoros  $L_{eq,1h}$  encontrados en ciudades de España e Italia, respecto de las variaciones con el nivel equivalente de las 24 horas,  $L_{eq,24h}$ , mientras que Carvalho [31], propone una metodología que minimiza el error en la estimación de niveles sonoros de mayor duración, seleccionando



apropiadamente la hora de inicio de la medición teniendo en cuenta la variación horaria en los niveles.

En otros casos, la variabilidad en los niveles sonoros se ha basado, por una parte, en ajustar los niveles sonoros a modelos de series temporales (procesos estocásticos) y por otra parte al ajuste de distribuciones estadísticas, dependiendo entre estos ajustes la duración de la medida. De esta forma respecto al ajuste a modelos de series temporales y para periodos de larga duración, en las referencias [19] y [20] se sugieren un modelo ARMA y para corta duración las referencias [41] y [42] ajustan a modelos ARIMA y SARIMA. Por la otra parte, respecto al ajuste a una variable estadística, Foxon y Pearson [43] sugiere una distribución Gaussiana, Kurze [44] propone una distribución gamma (gamma-distributed), y Don y Rees [45], rechazan el ajuste a una distribución Gaussiana para mediciones de 400 segundos de duración. Por último Tang y Au [46], establecen que solo bajo condiciones de tráfico de flujo libre (free-flow traffic) se puede asumir el ajuste a la distribución Gaussiana y bajo otras condiciones pueden aproximarse a distribuciones de Pearson tipo I y III para medidas de corta duración. El mismo autor Tang, en referencia [47] establece el ajuste a distribuciones con estructuras estadísticas similares. Bartolimi et al [48], realizan la comparación, también respecto de la distribución Gaussiana y la distribución Weibull, pero combinando los resultados correspondientes a medidas en distintas calles. Sin embargo, por lo general, estos autores no contemplan la posibilidad de realizar un ajuste estadístico de la distribución obtenida a partir de las medidas obtenidas a una hora específica del día con independencia de las realizadas a otras horas del día. En coherencia con esta consideración en este apartado de la presente Tesis se pretende desarrollar el posible ajuste estadístico de la distribución de los niveles sonoros,  $L_{eq1h}$  para cada una de las

horas del día (24 horas). Más en concreto, y teniendo en cuenta que se tienen tres franjas horarias a lo largo del día (DAY, EVENING y NIGHT), y que los niveles sonoros diarios pueden variar a lo largo del año, se pretende establecer que distribución estadística sigue la diferencia entre el nivel sonoro de una hora en concreto respecto del nivel sonoro diario correspondiente a la franja horaria en la cual es extraída la muestra. De esta forma, se tomarán 24 variables distintas (una para cada hora del día), describiendo previamente sus estadísticas y realizando los test de hipótesis [49, 50] correspondientes para determinar la bondad del ajuste a algún tipo de distribución estadística conocida como puede ser la distribución Normal, Binomial, Weibull, Pearson, Laplace,...etc.

Para realizar este desarrollo y para cada localización se han agrupado 24 variables que contienen los niveles equivalentes correspondientes a cada una de las horas del día, de esta forma la variable 1 almacena los 365 datos correspondientes al nivel  $L_{eq,1h}$  medido entre las 0:00-1:00 horas a lo largo del año, la variable 2, almacena los 365 datos correspondientes al nivel  $L_{eq,1h}$ , medido entre las 1:00-2:00 horas, la variable 3, almacena los 365 datos correspondientes al nivel  $L_{eq,1h}$ , medido entre las 2:00-3:00 horas ...y así sucesivamente. Para evitar la variabilidad diaria en los niveles sonoros a lo largo del año y teniendo en cuenta también las franjas horarias a lo largo del día las diferencias en los niveles sonoros entre el día y la noche se normaliza cada una de las variables de la siguiente forma:

Para cada una de las variables correspondientes a las horas del período NIGHT, se toma cada nivel equivalente de una hora de forma independiente,  $L_{eq,1h,i}$  ( $i=1,2,...365$ ) y se le resta el nivel sonoro equivalente a las 8 horas del período nocturno correspondiente al día al que pertenece la medida,  $L_{NIGHT,i}$ , de esta forma, la variable de análisis (para cada

hora) se corresponden con la series de datos:  $L_{eq,1h,i} - L_{NIGHT,i}$  ( $i=1,2,...365$ ). De la misma forma, se procede para cada una de las variables correspondientes a las horas del período EVENING, pero sustrayendo a cada hora,  $L_{eq,1h,i}$ , el nivel sonoro equivalente a las 4 horas del periodo EVENING,  $L_{EVENING,i}$ , obteniendo para cada una de las horas de la franja la serie de datos:  $L_{eq,1h,i} - L_{EVENING,i}$  ( $i=1,2,...365$ ). Y lo mismo para las variables de la franja DAY, pero restando el nivel sonoro ,  $L_{DAY,i}$ , de forma que se obtienen las series de datos:  $L_{eq,1h,i} - L_{DAY,i}$  ( $i=1,2,...365$ ). Una vez creadas las series de datos, el ajuste estadístico se ha realizado para cada año de forma independiente en lugar de tomar todos los años juntos, de forma que se pueda detectar si existen diferencias respecto de un año con otro en el ajuste estadístico.

### 5.2.2 ANÁLISIS Y RESULTADOS

La media y la desviación típica de cada una de las variables “normalizadas” para todos los años y localizaciones se puede observar en la tabla 5.2.1. Examinando estos resultados, se puede observar que el valor de la media para una hora específica no se corresponde con la misma hora en otras localizaciones y las máximas diferencias entre localizaciones tienen lugar en el período NIGHT. Por ejemplo, para la hora que va desde las 3:00 hasta las 4:00 h.(período NIGHT), la media varía desde -1,24 dB en la localización A hasta -2,97 dB en la localización D. Para la hora de 11:00 – 12:00 h. (período DAY) la media varía desde 0,17 dB en la localización A hasta -1,44 dB en la localización E, mientras que para la hora 21:00 – 22:00 h. (período EVENING), la media varia desde 0,04 dB en la localización A hasta los -0,56 dB en la localización E.

En general, las diferencias en el valor medio a una hora específica, para las horas correspondientes a los períodos DAY y EVENING, oscilan en un rango en torno a  $\pm 0.5$ dB al comparar entre localizaciones, siendo las menores diferencias las correspondientes al período EVENING, si bien se debe excluir los resultados para la localización E que presentan mayores diferencias con respecto a las otras localizaciones (afectadas por el ruido de tráfico). Lo mismo ocurre para la desviación típica, sin embargo estas diferencias entre localizaciones son numéricamente más pequeñas que las encontradas para la media. Para los períodos DAY y EVENING la desviación típica se encuentra en un rango de  $1 \pm 0.25$  dB para la mayoría de las horas, con la excepción de la localización C en el período DAY (debido al período de obras que provoca cambios importantes en la desviación típica. Si se excluyen los datos correspondientes a estas

fechas, las estadísticas entonces se asemejan a las otras localizaciones afectadas por el ruido de tráfico. Consultar dicha tabla en los anexos) y a la localización E.

|         | Hora                               | A     |                | B     |                | C     |                | D     |                | E     |                |
|---------|------------------------------------|-------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|
|         |                                    | $\mu$ | $\sigma_{n-1}$ | $\mu$ | $\sigma_{n-1}$ | $\mu$ | $\sigma_{n-1}$ | $\mu$ | $\sigma_{n-1}$ | $\mu$ | $\sigma_{n-1}$ |
| NIGHT   | 23 <sup>00</sup> –0 <sup>00</sup>  | 1,29  | 1,01           | 1,74  | 1,20           | 2,35  | 1,35           | 1,86  | 1,80           | 0,92  | 1,48           |
|         | 0 <sup>00</sup> –1 <sup>00</sup>   | 0,92  | 0,78           | 1,35  | 0,81           | 1,58  | 1,07           | 0,55  | 1,29           | 0,64  | 1,39           |
|         | 1 <sup>00</sup> –2 <sup>00</sup>   | 0,17  | 0,67           | 0,32  | 0,81           | 0,41  | 1,14           | -0,66 | 1,38           | -0,03 | 1,22           |
|         | 2 <sup>00</sup> –3 <sup>00</sup>   | -0,60 | 0,95           | -0,94 | 1,28           | -1,30 | 1,56           | -1,80 | 1,74           | -0,92 | 1,31           |
|         | 3 <sup>00</sup> –4 <sup>00</sup>   | -1,24 | 1,28           | -1,71 | 1,53           | -2,19 | 1,88           | -2,97 | 2,08           | -1,31 | 1,40           |
|         | 4 <sup>00</sup> –5 <sup>00</sup>   | -2,00 | 1,42           | -2,61 | 1,74           | -3,53 | 2,06           | -2,49 | 1,76           | -1,53 | 1,45           |
|         | 5 <sup>00</sup> –6 <sup>00</sup>   | -1,59 | 0,90           | -2,13 | 1,01           | -2,82 | 1,48           | -1,01 | 1,36           | -1,35 | 1,46           |
|         | 6 <sup>00</sup> –7 <sup>00</sup>   | 0,81  | 1,32           | 0,44  | 1,65           | -0,03 | 1,77           | 1,50  | 2,31           | 0,81  | 1,89           |
| DAY     | 7 <sup>00</sup> –8 <sup>00</sup>   | -0,69 | 0,96           | -1,66 | 1,16           | -2,54 | 2,21           | -1,56 | 1,18           | -0,13 | 2,67           |
|         | 8 <sup>00</sup> –9 <sup>00</sup>   | -0,25 | 1,16           | -0,72 | 1,31           | -0,77 | 2,00           | -0,01 | 1,17           | 0,08  | 2,82           |
|         | 9 <sup>00</sup> –10 <sup>00</sup>  | 0,47  | 1,38           | -0,14 | 1,14           | -0,12 | 1,86           | 0,01  | 1,05           | -0,55 | 3,01           |
|         | 10 <sup>00</sup> –11 <sup>00</sup> | 0,28  | 1,10           | -0,01 | 0,97           | 0,00  | 1,52           | 0,10  | 1,00           | -1,65 | 2,72           |
|         | 11 <sup>00</sup> –12 <sup>00</sup> | 0,17  | 0,96           | 0,28  | 0,91           | 0,43  | 1,55           | 0,28  | 1,01           | -1,44 | 2,35           |
|         | 12 <sup>00</sup> –13 <sup>00</sup> | 0,13  | 1,12           | 0,50  | 0,92           | 0,54  | 1,58           | 0,22  | 0,99           | -0,36 | 2,17           |
|         | 13 <sup>00</sup> –14 <sup>00</sup> | -0,02 | 0,91           | 0,49  | 0,90           | 0,35  | 1,87           | 0,21  | 0,99           | -0,34 | 2,35           |
|         | 14 <sup>00</sup> –15 <sup>00</sup> | -0,11 | 0,90           | 0,23  | 1,01           | -0,04 | 2,04           | 0,02  | 1,02           | -0,96 | 2,34           |
|         | 15 <sup>00</sup> –16 <sup>00</sup> | -0,47 | 0,82           | -0,42 | 0,89           | -0,95 | 1,48           | -0,56 | 0,97           | -1,37 | 2,33           |
|         | 16 <sup>00</sup> –17 <sup>00</sup> | -0,36 | 0,79           | -0,26 | 0,91           | -0,67 | 1,63           | -0,46 | 1,11           | -1,08 | 2,50           |
| EVENING | 17 <sup>00</sup> –18 <sup>00</sup> | -0,27 | 0,92           | -0,04 | 1,00           | -0,42 | 1,87           | -0,09 | 1,11           | -0,73 | 2,44           |
|         | 18 <sup>00</sup> –19 <sup>00</sup> | -0,51 | 1,07           | -0,02 | 1,11           | -0,61 | 2,25           | -0,21 | 1,09           | -0,47 | 2,54           |
|         | 19 <sup>00</sup> –20 <sup>00</sup> | 0,06  | 0,81           | 0,46  | 0,73           | 0,52  | 1,01           | 0,22  | 1,09           | 0,55  | 1,46           |
|         | 20 <sup>00</sup> –21 <sup>00</sup> | 0,02  | 0,71           | 0,18  | 0,67           | 0,36  | 0,92           | 0,25  | 0,96           | 0,05  | 1,18           |
|         | 21 <sup>00</sup> –22 <sup>00</sup> | 0,04  | 0,66           | -0,14 | 0,67           | -0,18 | 0,94           | -0,10 | 1,04           | -0,56 | 1,36           |
|         | 22 <sup>00</sup> –23 <sup>00</sup> | -0,38 | 0,80           | -0,85 | 0,90           | -1,40 | 1,13           | -0,98 | 1,30           | -1,11 | 1,82           |

Tabla 5.2.1. Media,  $\mu$ , y desviación típica,  $\sigma_{n-1}$ , para cada una de las horas de las series:

$L_{eq,1h} - L_{NIGHT}$ ,  $L_{eq,1h} - L_{DAY}$ ,  $L_{eq,1h} - L_{EVENING}$  contemplando todos los años

Para el período NIGHT, los valores de la media son mayores que respecto a los otros períodos y con mayores diferencias al comparar horas, si bien la localización E presenta en los valores medios la menor diferencia al comparar entre horas. De esta forma se puede indicar que, para los valores medios las mayores diferencias entre horas se corresponden al período NIGHT, mientras que las menores se corresponden con el período EVENING.

Estas consideraciones pueden ser observadas de forma más clara para los histogramas de distribución de las variables “normalizadas” en las figuras 5.2.3, 5.2.4 y 5.2.5 para la localización A en cada una de las franjas DAY, EVENING y NIGHT respectivamente. En estos histogramas se ha superpuesto el valor medio (representado a través del punto cuadrado) y la banda de probabilidad del 90% (representado a través de la línea continua vertical). Asimismo y superpuesto sobre cada uno de los histogramas se ha representado de forma teórica la función de distribución de una variable estadística de ajuste para los datos. En este caso la variable representada para cada una de las variables es la distribución de Laplace [49] (si bien los parámetros que definen esta distribución empírica son distintos para cada hora. Más adelante se analizarán otras distribuciones estadísticas posibles indicando cuál podría ser la más apropiada).

Para las otras localizaciones, los histogramas son similares con las correspondientes diferencias en la media y la dispersión de los datos propios de cada localización, resultado que puede observarse en las figuras de los anexos.

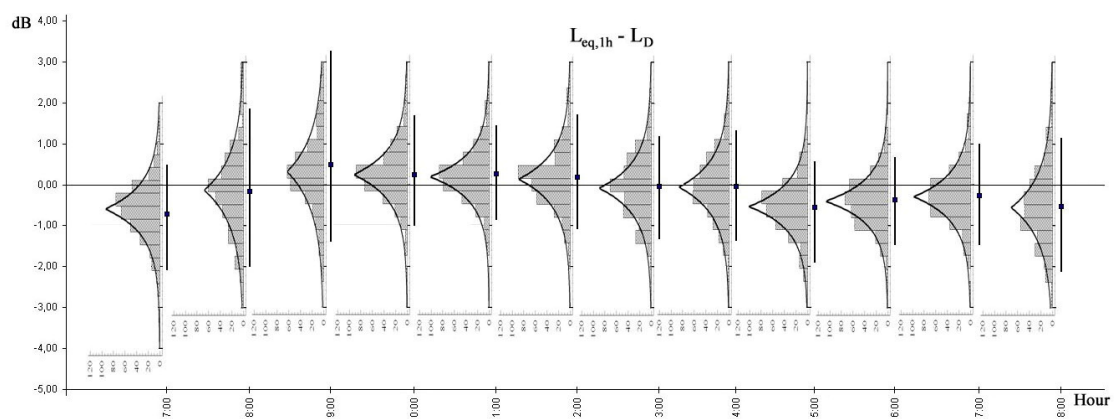


Figura 5.2.3. Distribución estadística para las variables normalizadas  $L_{eq,1h,i} - L_{DAY,i}$ , del año 2002 en la localización A.

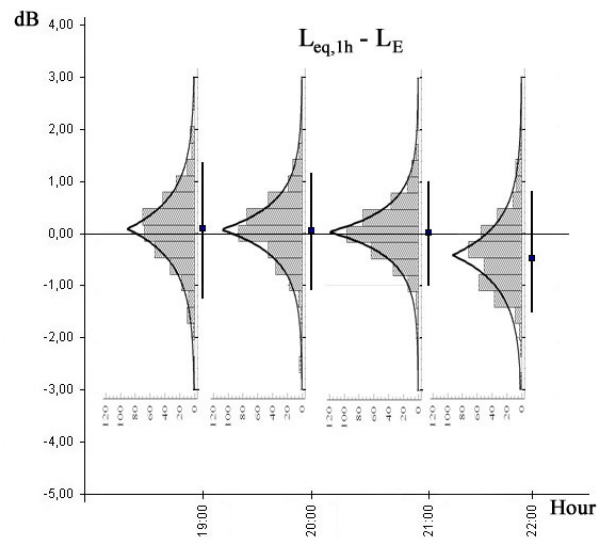


Figura 5.2.4. Distribución estadística para las variables normalizadas  $L_{eq,1h,i} - L_{EVENING,i}$ , del año 2002 en la localización A.

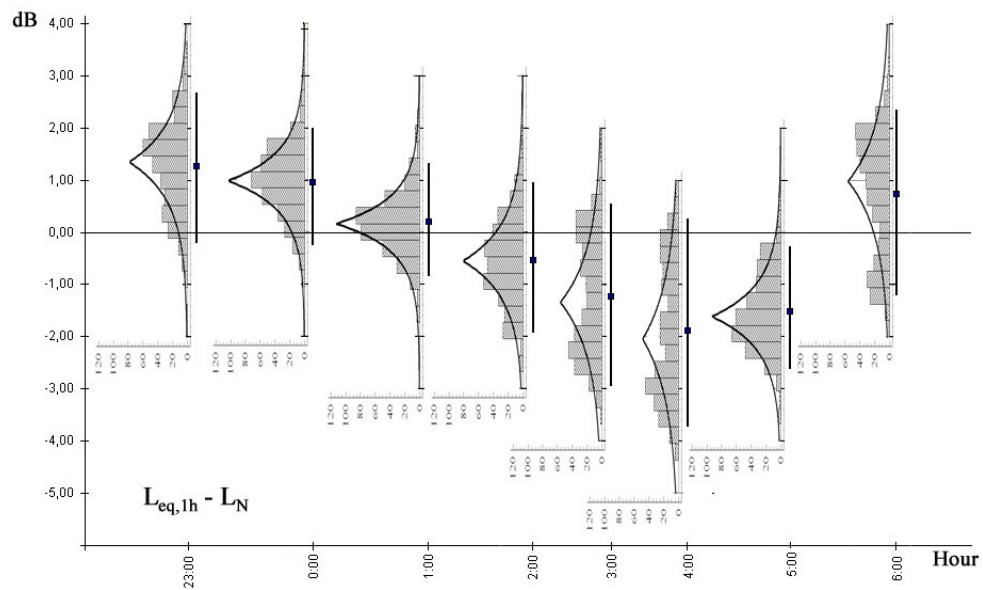


Figura 5.2.5. Distribución estadística para las variables normalizadas  $L_{eq,1h,i} - L_{NIGHT,i}$ , del año 2002 en la localización A.

Al mismo tiempo, si nos centramos en los resultados para una localización determinada, se puede observar que las estadísticas obtenidas para una hora determinada en un año concreto no son muy diferentes de las estadísticas de la misma hora para otros años, como se observa en la tabla 5.2.2 para la localización D (consultar anexos para el resto de localizaciones).

|         |                                    | 2001  |          | 2002  |          | 2003  |          | 2004  |          | 2005  |          |
|---------|------------------------------------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|
| Hora    |                                    | $\mu$ | $\sigma$ | $\mu$ | $\sigma$ | $\mu$ | $\sigma$ | $\mu$ | $\sigma$ | $\mu$ | $\sigma$ |
| NIGHT   | 23 <sup>00</sup> –0 <sup>00</sup>  | 1,46  | 1,33     | 1,96  | 1,70     | 2,03  | 1,79     | 2,05  | 2,06     | 1,80  | 1,95     |
|         | 0 <sup>00</sup> –1 <sup>00</sup>   | 0,57  | 1,21     | 0,66  | 1,31     | 0,45  | 1,24     | 0,47  | 1,26     | 0,58  | 1,41     |
|         | 1 <sup>00</sup> –2 <sup>00</sup>   | -0,60 | 1,11     | -0,68 | 1,47     | -0,71 | 1,52     | -0,86 | 1,50     | -0,44 | 1,23     |
|         | 2 <sup>00</sup> –3 <sup>00</sup>   | -1,53 | 1,64     | -1,72 | 1,77     | -1,98 | 1,78     | -1,87 | 1,78     | -1,89 | 1,70     |
|         | 3 <sup>00</sup> –4 <sup>00</sup>   | -2,56 | 2,02     | -2,96 | 1,99     | -3,09 | 1,99     | -3,19 | 2,27     | -3,06 | 2,08     |
|         | 4 <sup>00</sup> –5 <sup>00</sup>   | -2,11 | 1,66     | -2,48 | 1,60     | -2,29 | 1,66     | -2,76 | 1,91     | -2,80 | 1,87     |
|         | 5 <sup>00</sup> –6 <sup>00</sup>   | -0,52 | 1,05     | -1,27 | 1,22     | -1,35 | 1,24     | -0,92 | 1,51     | -0,99 | 1,54     |
|         | 6 <sup>00</sup> –7 <sup>00</sup>   | 1,24  | 2,31     | 1,49  | 2,14     | 1,58  | 2,34     | 1,63  | 2,35     | 1,53  | 2,39     |
| DAY     | 7 <sup>00</sup> –8 <sup>00</sup>   | -1,60 | 1,16     | -1,69 | 1,30     | -1,55 | 1,20     | -1,42 | 1,16     | -1,52 | 1,09     |
|         | 8 <sup>00</sup> –9 <sup>00</sup>   | 0,22  | 1,04     | 0,12  | 1,23     | 0,17  | 1,06     | -0,27 | 1,15     | -0,29 | 1,27     |
|         | 9 <sup>00</sup> –10 <sup>00</sup>  | -0,16 | 1,10     | -0,13 | 1,17     | 0,04  | 1,10     | 0,20  | 0,87     | 0,11  | 0,95     |
|         | 10 <sup>00</sup> –11 <sup>00</sup> | 0,12  | 1,13     | 0,09  | 1,07     | 0,05  | 0,93     | 0,10  | 0,90     | 0,15  | 0,93     |
|         | 11 <sup>00</sup> –12 <sup>00</sup> | 0,26  | 1,09     | 0,29  | 1,04     | 0,21  | 1,01     | 0,24  | 0,81     | 0,37  | 1,06     |
|         | 12 <sup>00</sup> –13 <sup>00</sup> | 0,24  | 1,00     | 0,28  | 1,05     | 0,21  | 0,90     | 0,19  | 0,89     | 0,17  | 1,07     |
|         | 13 <sup>00</sup> –14 <sup>00</sup> | 0,27  | 1,17     | 0,14  | 1,02     | 0,17  | 0,90     | 0,23  | 0,91     | 0,23  | 0,95     |
|         | 14 <sup>00</sup> –15 <sup>00</sup> | 0,02  | 1,02     | 0,04  | 1,01     | 0,09  | 1,14     | 0,02  | 0,90     | -0,06 | 1,01     |
|         | 15 <sup>00</sup> –16 <sup>00</sup> | -0,69 | 1,05     | -0,58 | 1,06     | -0,49 | 0,92     | -0,42 | 0,90     | -0,63 | 0,89     |
|         | 16 <sup>00</sup> –17 <sup>00</sup> | -0,65 | 1,17     | -0,53 | 1,15     | -0,53 | 1,04     | -0,36 | 0,96     | -0,24 | 1,18     |
| EVENING | 17 <sup>00</sup> –18 <sup>00</sup> | -0,10 | 1,03     | -0,06 | 1,20     | -0,06 | 1,13     | -0,13 | 0,99     | -0,13 | 1,17     |
|         | 18 <sup>00</sup> –19 <sup>00</sup> | -0,18 | 1,19     | -0,26 | 1,13     | -0,25 | 0,95     | -0,11 | 1,14     | -0,24 | 1,03     |
|         | 19 <sup>00</sup> –20 <sup>00</sup> | 0,26  | 1,22     | 0,24  | 1,02     | 0,12  | 1,15     | 0,20  | 1,03     | 0,29  | 1,01     |
|         | 20 <sup>00</sup> –21 <sup>00</sup> | 0,23  | 1,09     | 0,28  | 0,93     | 0,21  | 1,02     | 0,27  | 0,94     | 0,27  | 0,82     |
|         | 21 <sup>00</sup> –22 <sup>00</sup> | -0,17 | 1,13     | -0,06 | 0,84     | -0,09 | 1,25     | -0,08 | 0,98     | -0,10 | 0,91     |
|         | 22 <sup>00</sup> –23 <sup>00</sup> | -0,98 | 1,38     | -1,02 | 1,11     | -0,94 | 1,43     | -0,94 | 1,29     | -1,01 | 1,27     |

Tabla 5.2.2. Media anual ( $\mu$ ), y desviación típica ( $\sigma$ ) en diferentes años para cada una de las series normalizadas  $L_{eq,1h,i} - L_{DAY,i}$ ,  $L_{eq,1h,i} - L_{EVENING,i}$  y  $L_{eq,1h,i} - L_{NIGHT,i}$ , en la localización D.

A partir de la tabla 5.2.2 y al comparar las medias anuales en distintos años para una hora en particular en la localización D, se observa que las máximas diferencias entre



años se producen en la franja NIGHT (frente a otras franjas), con valores que van desde los 0,2 dB hasta los 0,8 dB al comparar entre horas. Esta característica también se observa para la desviación típica con variaciones entre años que van desde 0.1 dB hasta 0.7 dB al comparar las horas. Para las franjas DAY y EVENING las máximas diferencias para la media están en torno a 0.1 dB y de 0.2 dB para la desviación típica. Ocurrendo de forma similar en las otras localizaciones (consultar anexos).

Para chequear si cada una de las horas (variables normalizadas) de cada año se ajusta a una distribución estadística se han aplicado tres tests estadísticos: El test de hipótesis de Kolmogorov- Smirnov, el test de hipótesis Anderson-Darling y el test de hipótesis Chi-Cuadrado [50], con un nivel de confianza del 95% ( $\alpha = 0,05$ ). Cuando la variable analizada superaba simultáneamente todos los tests se consideraba que el ajuste para la distribución estadística evaluada era adecuado para esa hora determinada (y año). Las distribuciones estadísticas evaluadas han sido: Cauchi, Log-Logistic(3P), Johnson SU, Laplace, Gen. Extreme Value, Logistic, Frechet(3P), Beta, Normal, Fatigue Life(3P), Lognormal (3P), Inv. Gaussian(3P), Erlang (3P), Gamma(3P), Gen. Pareto, Student's t, Gumbel max., Error Function, Gumbel Min, Uniform, Weibull (3P), Pert, Triangular, Chi-Squared (2P), Rayleigh (2P), Power Function, Exponential (2P), Chi-Squared, Erlang, Exponential, Fatigue Life, Frechet, Gamma, Inv. Gaussian, Johnson SB y Log-Logistic.

En la tabla 5.2.3 se muestra el porcentaje de horas que han superado los tests de hipótesis para las distribuciones estadísticas que presentan los mejores resultados contemplando todas las horas y todos los años. (Los resultados para cada año y para el resto de distribuciones pueden consultarse en los anexos).

Se observa que los mejores resultados se corresponden con las distribuciones estadísticas Log-Logistic(3P) y Johnson SU en todas las localizaciones. Del resto de distribuciones las siguientes en presentar mejores resultados son las distribuciones Logistic y Laplace pero dependiendo de la localización, ya que no son tan claros como las distribuciones anteriores.

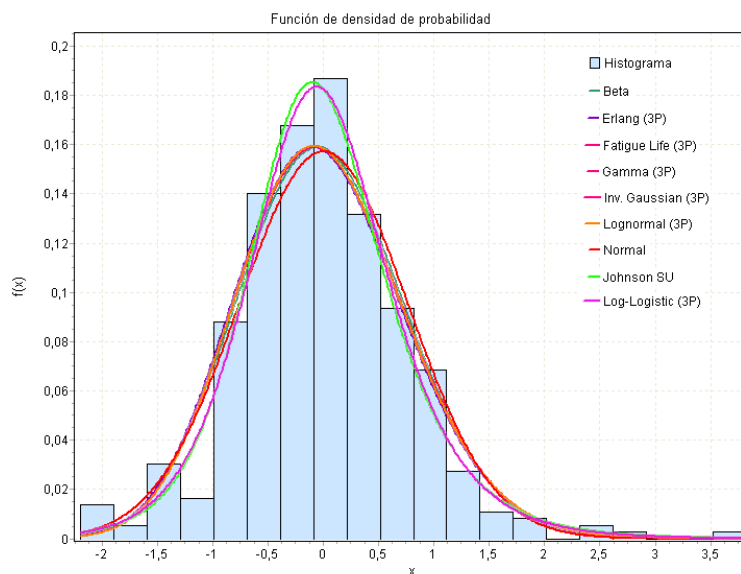
| Distribución              | Localización |       |       |       |       |
|---------------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|
|                           | A            | B     | C     | D     | E     |
| <b>Cauchi</b>             | 34,2%        | 4,2%  | 15,8% | 6,7%  | 5,8%  |
| <b>Log-Logistic(3P)</b>   | 68,3%        | 45,0% | 32,5% | 45,8% | 65,8% |
| <b>Johnson SU</b>         | 50,0%        | 37,5% | 26,7% | 25,0% | 66,7% |
| <b>Laplace</b>            | 42,5%        | 18,3% | 18,3% | 16,7% | 24,2% |
| <b>Gen. Extreme Value</b> | 25,0%        | 22,5% | 4,2%  | 4,2%  | 13,3% |
| <b>Logistic</b>           | 47,5%        | 26,7% | 9,2%  | 5,8%  | 38,3% |
| <b>Beta</b>               | 40,8%        | 21,7% | 5,8%  | 0,8%  | 38,3% |
| <b>Normal</b>             | 29,2%        | 15,8% | 5,0%  | 2,5%  | 29,2% |
| <b>Fatigue Life(3P)</b>   | 34,2%        | 18,3% | 5,0%  | 2,5%  | 30,0% |
| <b>Lognormal (3P)</b>     | 33,3%        | 19,2% | 6,7%  | 1,7%  | 25,0% |
| <b>Inv. Gaussian(3P)</b>  | 31,7%        | 15,0% | 4,2%  | 3,3%  | 27,5% |
| <b>Erlang (3P)</b>        | 28,3%        | 12,5% | 2,5%  | 2,5%  | 23,3% |
| <b>Gamma(3P)</b>          | 32,5%        | 16,7% | 3,3%  | 0,8%  | 20,0% |

Tabla 5.2.3. Porcentaje de horas que superan los test de hipótesis en cada localización contemplando todas las horas y todos los años.

También se observa que en la localización C los porcentajes de horas que superan los test de hipótesis son menores que para el resto de localizaciones. Como en anteriores resultados de la presente Tesis Doctoral esto es debido fundamentalmente a los períodos de obras que presenta dicha localización, ya que en esos años las variables analizadas estadísticamente para cada hora presentan una mayor proporción de valores lejanos al valor medio (colas gruesas), lo que hace que el ajuste a una variable estadística sea más inapropiado. En el resto de años, para esta localización, que no presentan los períodos

de obras los porcentajes se asemejan a los obtenidos en las otras localizaciones (consultar los anexos).

De la misma forma, también se puede observar que existen otras posibles variables estadísticas para el ajuste aparte de las mencionadas con los mejores resultados. Ahora, se debe mencionar que en los parámetros ajustados para cada distribución, dichas distribuciones, al compararlas, tienen estructuras estadísticas similares. De hecho, las estructuras estadísticas de las distribuciones Log-Logistic(3P) y Johnson SU ajustadas son similares. A modo de ejemplo, la figura 5.2.6 muestra este efecto para diferentes distribuciones estadísticas del ajuste de la variable de las 17 horas en el año 2004 para la localización B.



No obstante, y como los ajustes estadísticos están referidos a cada una de las franjas horarias, es más conveniente mostrar los porcentajes de horas ajustadas por franjas horarias, de este modo la tabla 5.2.4 muestra dichos resultados porcentuales subdivididos por las franjas horarias DAY, EVENING y NIGHT.

|              |                    | Localización |       |       |       |       |
|--------------|--------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|
| Distribución |                    | A            | B     | C     | D     | E     |
| DAY          | Cauchi             | 38,3%        | 8,3%  | 23,3% | 6,7%  | 1,7%  |
|              | Log-Logistic(3P)   | 71,7%        | 40,0% | 21,7% | 48,3% | 71,7% |
|              | Johnson SU         | 60,0%        | 31,7% | 21,7% | 28,3% | 75,0% |
|              | Laplace            | 50,0%        | 11,7% | 8,3%  | 16,7% | 16,7% |
|              | Gen. Extreme Value | 18,3%        | 30,0% | 3,3%  | 5,0%  | 21,7% |
|              | Logistic           | 46,7%        | 8,3%  | 0,0%  | 3,3%  | 53,3% |
|              | Beta               | 33,3%        | 10,0% | 0,0%  | 0,0%  | 63,3% |
|              | Normal             | 25,0%        | 3,3%  | 0,0%  | 0,0%  | 48,3% |
|              | Fatigue Life(3P)   | 28,3%        | 11,7% | 0,0%  | 1,7%  | 48,3% |
|              | Lognormal (3P)     | 28,3%        | 13,3% | 0,0%  | 1,7%  | 41,7% |
|              | Inv. Gaussian(3P)  | 28,3%        | 3,3%  | 0,0%  | 1,7%  | 46,7% |
|              | Erlang (3P)        | 30,0%        | 3,3%  | 0,0%  | 0,0%  | 36,7% |
|              | Gamma(3P)          | 26,7%        | 11,7% | 0,0%  | 0,0%  | 31,7% |
| EVENING      | Cauchi             | 55,0%        | 0,0%  | 20,0% | 20,0% | 5,0%  |
|              | Log-Logistic(3P)   | 90,0%        | 95,0% | 65,0% | 45,0% | 35,0% |
|              | Johnson SU         | 70,0%        | 70,0% | 45,0% | 15,0% | 50,0% |
|              | Laplace            | 80,0%        | 55,0% | 70,0% | 35,0% | 30,0% |
|              | Gen. Extreme Value | 10,0%        | 10,0% | 0,0%  | 0,0%  | 10,0% |
|              | Logistic           | 65,0%        | 80,0% | 25,0% | 5,0%  | 20,0% |
|              | Beta               | 40,0%        | 50,0% | 5,0%  | 0,0%  | 10,0% |
|              | Normal             | 20,0%        | 45,0% | 5,0%  | 0,0%  | 5,0%  |
|              | Fatigue Life(3P)   | 30,0%        | 45,0% | 5,0%  | 5,0%  | 10,0% |
|              | Lognormal (3P)     | 25,0%        | 45,0% | 10,0% | 0,0%  | 10,0% |
|              | Inv. Gaussian(3P)  | 20,0%        | 50,0% | 5,0%  | 0,0%  | 5,0%  |
|              | Erlang (3P)        | 15,0%        | 45,0% | 0,0%  | 0,0%  | 10,0% |
|              | Gamma(3P)          | 25,0%        | 40,0% | 0,0%  | 0,0%  | 10,0% |
| NIGHT        | Cauchi             | 17,5%        | 0,0%  | 2,5%  | 0,0%  | 12,5% |
|              | Log-Logistic(3P)   | 52,5%        | 27,5% | 32,5% | 42,5% | 72,5% |
|              | Johnson SU         | 25,0%        | 30,0% | 25,0% | 25,0% | 62,5% |
|              | Laplace            | 12,5%        | 10,0% | 7,5%  | 7,5%  | 32,5% |
|              | Gen. Extreme Value | 42,5%        | 17,5% | 7,5%  | 5,0%  | 2,5%  |
|              | Logistic           | 40,0%        | 27,5% | 15,0% | 10,0% | 25,0% |
|              | Beta               | 52,5%        | 25,0% | 15,0% | 2,5%  | 15,0% |
|              | Normal             | 40,0%        | 20,0% | 12,5% | 7,5%  | 12,5% |
|              | Fatigue Life(3P)   | 45,0%        | 15,0% | 12,5% | 2,5%  | 12,5% |
|              | Lognormal (3P)     | 45,0%        | 15,0% | 15,0% | 2,5%  | 7,5%  |
|              | Inv. Gaussian(3P)  | 42,5%        | 15,0% | 10,0% | 7,5%  | 10,0% |
|              | Erlang (3P)        | 32,5%        | 10,0% | 7,5%  | 7,5%  | 10,0% |
|              | Gamma(3P)          | 45,0%        | 12,5% | 10,0% | 2,5%  | 7,5%  |

Tabla 5.2.4. Porcentaje de horas que superan los tests de hipótesis en cada localización

y para cada franja horaria contemplando todos los años.

A la vista de la misma, en general, puede observarse que para las localizaciones A, B, C y D (afectadas por el ruido de tráfico), la franja horaria EVENING presenta una mayor proporción de ajustes estadísticos seguida de la franja DAY y por último la franja NIGHT. Mientras, para la localización E las franjas DAY y NIGHT presentan mejores resultados que la franja EVENING. Esto podría explicarse atendiendo a que en las franjas horarias con mayor actividad la posibilidad de eventos extremos (colas gruesas) es mayor y por tanto el ajuste estadístico a una distribución estadística es menos probable. Para las localizaciones afectadas por el ruido de tráfico la franja más “estable” es la franja EVENING, mientras que para la localización E serían la franja DAY y NIGHT. Si centramos el análisis en las distribuciones que presentan un mayor ajuste (distribuciones Log-Logistic (3P) y Johnson SU), se pueden comparar los resultados para cada hora de forma que se pueda deducir si el ajuste estadístico se da con mayor probabilidad para unas horas determinadas que para otras. De esta forma la tabla 5.2.5 muestra el porcentaje de años ajustados por cada tipo de distribución para cada una de las 24 horas del día.

Se observa que, para las localizaciones afectadas por el ruido de tráfico, aquellas horas para las cuales la desviación típica de los datos normalizados ( $L_{Aeq,1h} - L_{D, E, N}$ ) era elevada ( $\sigma_{n-1} > 1$  dB, ver datos a partir tabla 5.2.1) tienen peores ajustes estadísticos y que las horas del período NIGHT y las primeras horas del período DAY tienen menor probabilidad de ajuste. Por el contrario, las horas con menor dispersión ( $\sigma_{n-1} < 1$  dB) presentan un mejor ajuste estadístico. De esta forma, y teniendo en cuenta todas las localizaciones, se podría indicar que las horas con menor proporción de ajustes se corresponden a las 3:00-4:00h; 4:00-5:00h y 6:00-7:00h dentro del período NIGHT y las 7:00-8:00h junto a las 8:00-9:00 h para la franja DAY. Por el contrario, las horas que

presentan una mayor proporción de ajustes se corresponden con las 1:00h – 2:00h para el período NIGHT junto a las 19:00h – 20:00h y las 22:00h – 23:00h del período EVENING, no pudiendo generalizar para el resto de horas. Para la localización E, los mejores ajustes se producen para el período NIGHT (que se corresponde con el período de menores variaciones en contraposición con las localizaciones afectadas por el ruido de tráfico).

|         |                                    | Log-Logistic 3P |      |      |      |      | Johnson SU |      |      |     |      |
|---------|------------------------------------|-----------------|------|------|------|------|------------|------|------|-----|------|
|         | Hora                               | A               | B    | C    | D    | E    | A          | B    | C    | D   | E    |
| NIGHT   | 23 <sup>00</sup> –0 <sup>00</sup>  | 20%             | 20%  | 0%   | 80%  | 100% | 60%        | 80%  | 20%  | 60% | 100% |
|         | 0 <sup>00</sup> –1 <sup>00</sup>   | 80%             | 60%  | 40%  | 100% | 80%  | 20%        | 60%  | 20%  | 40% | 80%  |
|         | 1 <sup>00</sup> –2 <sup>00</sup>   | 100%            | 80%  | 80%  | 100% | 60%  | 100%       | 80%  | 60%  | 80% | 40%  |
|         | 2 <sup>00</sup> –3 <sup>00</sup>   | 80%             | 0%   | 60%  | 20%  | 80%  | 0%         | 0%   | 60%  | 0%  | 80%  |
|         | 3 <sup>00</sup> –4 <sup>00</sup>   | 20%             | 0%   | 0%   | 0%   | 60%  | 0%         | 0%   | 0%   | 0%  | 60%  |
|         | 4 <sup>00</sup> –5 <sup>00</sup>   | 40%             | 0%   | 0%   | 0%   | 80%  | 0%         | 0%   | 0%   | 0%  | 60%  |
|         | 5 <sup>00</sup> –6 <sup>00</sup>   | 80%             | 60%  | 80%  | 40%  | 40%  | 20%        | 20%  | 40%  | 20% | 20%  |
|         | 6 <sup>00</sup> –7 <sup>00</sup>   | 0%              | 0%   | 0%   | 0%   | 80%  | 0%         | 0%   | 0%   | 0%  | 60%  |
| DAY     | 7 <sup>00</sup> –8 <sup>00</sup>   | 40%             | 20%  | 20%  | 0%   | 20%  | 60%        | 20%  | 40%  | 0%  | 40%  |
|         | 8 <sup>00</sup> –9 <sup>00</sup>   | 60%             | 0%   | 0%   | 20%  | 80%  | 60%        | 0%   | 0%   | 20% | 60%  |
|         | 9 <sup>00</sup> –10 <sup>00</sup>  | 40%             | 0%   | 0%   | 60%  | 100% | 40%        | 0%   | 0%   | 20% | 80%  |
|         | 10 <sup>00</sup> –11 <sup>00</sup> | 40%             | 40%  | 20%  | 40%  | 100% | 40%        | 40%  | 20%  | 20% | 100% |
|         | 11 <sup>00</sup> –12 <sup>00</sup> | 80%             | 60%  | 20%  | 60%  | 100% | 60%        | 20%  | 0%   | 20% | 100% |
|         | 12 <sup>00</sup> –13 <sup>00</sup> | 60%             | 60%  | 40%  | 60%  | 80%  | 20%        | 20%  | 40%  | 40% | 60%  |
|         | 13 <sup>00</sup> –14 <sup>00</sup> | 100%            | 60%  | 40%  | 60%  | 60%  | 80%        | 40%  | 60%  | 40% | 100% |
|         | 14 <sup>00</sup> –15 <sup>00</sup> | 100%            | 40%  | 40%  | 80%  | 20%  | 80%        | 40%  | 20%  | 80% | 60%  |
|         | 15 <sup>00</sup> –16 <sup>00</sup> | 100%            | 60%  | 40%  | 60%  | 60%  | 80%        | 40%  | 20%  | 20% | 60%  |
|         | 16 <sup>00</sup> –17 <sup>00</sup> | 100%            | 60%  | 0%   | 40%  | 80%  | 100%       | 40%  | 0%   | 0%  | 80%  |
| EVENING | 17 <sup>00</sup> –18 <sup>00</sup> | 60%             | 60%  | 20%  | 40%  | 60%  | 40%        | 60%  | 20%  | 20% | 80%  |
|         | 18 <sup>00</sup> –19 <sup>00</sup> | 80%             | 20%  | 20%  | 60%  | 100% | 60%        | 60%  | 40%  | 60% | 80%  |
|         | 19 <sup>00</sup> –20 <sup>00</sup> | 100%            | 100% | 100% | 60%  | 60%  | 80%        | 100% | 40%  | 20% | 60%  |
|         | 20 <sup>00</sup> –21 <sup>00</sup> | 80%             | 80%  | 60%  | 20%  | 80%  | 100%       | 60%  | 40%  | 20% | 80%  |
|         | 21 <sup>00</sup> –22 <sup>00</sup> | 80%             | 100% | 20%  | 20%  | 0%   | 60%        | 40%  | 0%   | 0%  | 40%  |
|         | 22 <sup>00</sup> –23 <sup>00</sup> | 100%            | 100% | 80%  | 80%  | 0%   | 40%        | 80%  | 100% | 20% | 20%  |

Tabla 5.2.5. Porcentaje de años que ajustan a las distribuciones Log-Logistic3P y Johnson SU para cada una de las horas del día.

Si se tiene en cuenta el ajuste estadístico para cualquier distribución estadística, la tabla 5.2.6 muestra el porcentaje de años ajustados a alguna distribución estadística (con

independencia de que sean distintas distribuciones). En este caso los porcentajes son superiores que los mostrados en la tabla 5.2.5 para distribuciones estadísticas específicas.

|         | Hora                               | A    | B    | C    | D    | E    |
|---------|------------------------------------|------|------|------|------|------|
| NIGHT   | 23 <sup>00</sup> -0 <sup>00</sup>  | 80%  | 80%  | 20%  | 80%  | 100% |
|         | 0 <sup>00</sup> -1 <sup>00</sup>   | 100% | 60%  | 60%  | 100% | 80%  |
|         | 1 <sup>00</sup> -2 <sup>00</sup>   | 100% | 100% | 80%  | 100% | 80%  |
|         | 2 <sup>00</sup> -3 <sup>00</sup>   | 100% | 60%  | 80%  | 40%  | 100% |
|         | 3 <sup>00</sup> -4 <sup>00</sup>   | 80%  | 0%   | 40%  | 0%   | 60%  |
|         | 4 <sup>00</sup> -5 <sup>00</sup>   | 40%  | 0%   | 40%  | 0%   | 80%  |
|         | 5 <sup>00</sup> -6 <sup>00</sup>   | 80%  | 80%  | 80%  | 60%  | 40%  |
|         | 6 <sup>00</sup> -7 <sup>00</sup>   | 20%  | 0%   | 40%  | 0%   | 100% |
| DAY     | 7 <sup>00</sup> -8 <sup>00</sup>   | 100% | 20%  | 40%  | 0%   | 100% |
|         | 8 <sup>00</sup> -9 <sup>00</sup>   | 100% | 0%   | 0%   | 20%  | 100% |
|         | 9 <sup>00</sup> -10 <sup>00</sup>  | 100% | 20%  | 20%  | 60%  | 100% |
|         | 10 <sup>00</sup> -11 <sup>00</sup> | 100% | 60%  | 100% | 60%  | 100% |
|         | 11 <sup>00</sup> -12 <sup>00</sup> | 100% | 80%  | 60%  | 80%  | 100% |
|         | 12 <sup>00</sup> -13 <sup>00</sup> | 100% | 60%  | 80%  | 60%  | 100% |
|         | 13 <sup>00</sup> -14 <sup>00</sup> | 100% | 60%  | 80%  | 60%  | 100% |
|         | 14 <sup>00</sup> -15 <sup>00</sup> | 100% | 60%  | 40%  | 100% | 60%  |
|         | 15 <sup>00</sup> -16 <sup>00</sup> | 100% | 60%  | 60%  | 60%  | 100% |
|         | 16 <sup>00</sup> -17 <sup>00</sup> | 100% | 60%  | 20%  | 40%  | 80%  |
|         | 17 <sup>00</sup> -18 <sup>00</sup> | 100% | 60%  | 40%  | 40%  | 100% |
|         | 18 <sup>00</sup> -19 <sup>00</sup> | 100% | 60%  | 60%  | 80%  | 100% |
| EVENING | 19 <sup>00</sup> -20 <sup>00</sup> | 100% | 100% | 100% | 60%  | 80%  |
|         | 20 <sup>00</sup> -21 <sup>00</sup> | 100% | 80%  | 100% | 60%  | 80%  |
|         | 21 <sup>00</sup> -22 <sup>00</sup> | 80%  | 100% | 80%  | 60%  | 40%  |
|         | 22 <sup>00</sup> -23 <sup>00</sup> | 100% | 100% | 100% | 80%  | 60%  |

Tabla 5.2.6. Porcentaje de años que ajustan a alguna distribución estadística para cada una de las horas del día y localización.

Finalmente, y a modo de resumen, las tablas 5.2.7, 5.2.8, 5.2.9 y 5.2.10 muestran los resultados del ajuste a la distribución Johnson SU para cada una de las localizaciones en el año 2005 con la exclusión de la localización C por presentar solo una única hora de ajuste (Para el resto de años y también para la localización C, consultar en los anexos.

La distribución Johnson SU se define a partir de la función de distribución:

$$f(x) = \frac{\delta}{\lambda \cdot \sqrt{2\pi} \cdot \sqrt{z^2 + 1}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left[ \gamma + \delta \cdot \ln \left( z + \sqrt{z^2 + 1} \right) \right]^2} \quad \text{con} \quad z = \frac{x - \xi}{\lambda}$$

|         |                                    | LOCALIZACION A |          |           |         |
|---------|------------------------------------|----------------|----------|-----------|---------|
|         |                                    | Parámetros     |          |           |         |
|         | Hora                               | $\gamma$       | $\delta$ | $\lambda$ | $\xi$   |
| NIGHT   | 23 <sup>00</sup> –0 <sup>00</sup>  | 0,8142         | 1,6961   | 1,1862    | 1,8004  |
|         | 0 <sup>00</sup> –1 <sup>00</sup>   |                |          |           |         |
|         | 1 <sup>00</sup> –2 <sup>00</sup>   | -0,7919        | 1,9563   | 0,8895    | -0,2582 |
|         | 2 <sup>00</sup> –3 <sup>00</sup>   |                |          |           |         |
|         | 3 <sup>00</sup> –4 <sup>00</sup>   |                |          |           |         |
|         | 4 <sup>00</sup> –5 <sup>00</sup>   |                |          |           |         |
|         | 5 <sup>00</sup> –6 <sup>00</sup>   | -1,0177        | 1,7802   | 0,9801    | -2,0283 |
| DAY     | 6 <sup>00</sup> –7 <sup>00</sup>   |                |          |           |         |
|         | 7 <sup>00</sup> –8 <sup>00</sup>   | 0,4902         | 1,2745   | 0,7142    | -0,2546 |
|         | 8 <sup>00</sup> –9 <sup>00</sup>   | 0,0180         | 1,3993   | 1,1342    | -0,1613 |
|         | 9 <sup>00</sup> –10 <sup>00</sup>  |                |          |           |         |
|         | 10 <sup>00</sup> –11 <sup>00</sup> |                |          |           |         |
|         | 11 <sup>00</sup> –12 <sup>00</sup> |                |          |           |         |
|         | 12 <sup>00</sup> –13 <sup>00</sup> |                |          |           |         |
|         | 13 <sup>00</sup> –14 <sup>00</sup> |                |          |           |         |
|         | 14 <sup>00</sup> –15 <sup>00</sup> | -0,1945        | 1,6228   | 1,1121    | -0,2190 |
|         | 15 <sup>00</sup> –16 <sup>00</sup> | 0,0553         | 1,5959   | 0,9934    | -0,4561 |
|         | 16 <sup>00</sup> –17 <sup>00</sup> | -0,0049        | 1,6044   | 0,9141    | -0,3911 |
| EVENING | 17 <sup>00</sup> –18 <sup>00</sup> | 0,1331         | 1,6253   | 1,0405    | -0,2461 |
|         | 18 <sup>00</sup> –19 <sup>00</sup> | 0,2183         | 1,9819   | 1,5376    | -0,2056 |
|         | 19 <sup>00</sup> –20 <sup>00</sup> | 0,0688         | 1,4020   | 0,7895    | 0,1771  |
|         | 20 <sup>00</sup> –21 <sup>00</sup> | 0,4123         | 1,4326   | 0,6778    | 0,3847  |
|         | 21 <sup>00</sup> –22 <sup>00</sup> | 0,2351         | 2,1514   | 1,0595    | 0,1347  |
|         | 22 <sup>00</sup> –23 <sup>00</sup> | 0,1004         | 1,2206   | 0,6350    | -0,4320 |

Tabla 5.2.7. Parámetros del ajuste a la distribución Johnson SU para cada una de las horas de la localización A correspondientes al año 2005.



|         |                                    | LOCALIZACION B |          |           |         |
|---------|------------------------------------|----------------|----------|-----------|---------|
|         |                                    | Parámetros     |          |           |         |
|         | Hora                               | $\gamma$       | $\delta$ | $\lambda$ | $\xi$   |
| NIGHT   | 23 <sup>00</sup> –0 <sup>00</sup>  | 0,5897         | 1,7950   | 1,7536    | 2,3559  |
|         | 0 <sup>00</sup> –1 <sup>00</sup>   | 0,1935         | 1,6983   | 1,1464    | 1,4117  |
|         | 1 <sup>00</sup> –2 <sup>00</sup>   | -0,6655        | 1,9192   | 1,4435    | -0,3784 |
|         | 2 <sup>00</sup> –3 <sup>00</sup>   |                |          |           |         |
|         | 3 <sup>00</sup> –4 <sup>00</sup>   |                |          |           |         |
|         | 4 <sup>00</sup> –5 <sup>00</sup>   |                |          |           |         |
|         | 5 <sup>00</sup> –6 <sup>00</sup>   | -0,6077        | 1,6801   | 1,1941    | -2,4621 |
|         | 6 <sup>00</sup> –7 <sup>00</sup>   |                |          |           |         |
| DAY     | 7 <sup>00</sup> –8 <sup>00</sup>   |                |          |           |         |
|         | 8 <sup>00</sup> –9 <sup>00</sup>   |                |          |           |         |
|         | 9 <sup>00</sup> –10 <sup>00</sup>  |                |          |           |         |
|         | 10 <sup>00</sup> –11 <sup>00</sup> | -0,5321        | 1,1975   | 0,6769    | -0,4543 |
|         | 11 <sup>00</sup> –12 <sup>00</sup> | -0,3503        | 1,4148   | 0,8635    | 0,0237  |
|         | 12 <sup>00</sup> –13 <sup>00</sup> |                |          |           |         |
|         | 13 <sup>00</sup> –14 <sup>00</sup> | -0,0654        | 1,2792   | 0,7789    | 0,4359  |
|         | 14 <sup>00</sup> –15 <sup>00</sup> |                |          |           |         |
|         | 15 <sup>00</sup> –16 <sup>00</sup> |                |          |           |         |
|         | 16 <sup>00</sup> –17 <sup>00</sup> |                |          |           |         |
|         | 17 <sup>00</sup> –18 <sup>00</sup> | -0,2010        | 1,5328   | 1,0818    | -0,3175 |
|         | 18 <sup>00</sup> –19 <sup>00</sup> | -0,0156        | 1,5385   | 1,2037    | 0,1005  |
| EVENING | 19 <sup>00</sup> –20 <sup>00</sup> | -0,0775        | 1,8965   | 1,2723    | 0,5021  |
|         | 20 <sup>00</sup> –21 <sup>00</sup> | 0,0968         | 2,2914   | 1,5489    | 0,3378  |
|         | 21 <sup>00</sup> –22 <sup>00</sup> |                |          |           |         |
|         | 22 <sup>00</sup> –23 <sup>00</sup> | -0,4614        | 2,5248   | 2,1228    | -1,4983 |

Tabla 5.2.8. Parámetros del ajuste a la distribución Johnson SU para cada una de las horas de la localización B correspondientes al año 2005.

|         |                                    | LOCALIZACION D |          |           |         |
|---------|------------------------------------|----------------|----------|-----------|---------|
|         |                                    | Parámetros     |          |           |         |
|         | Hora                               | $\gamma$       | $\delta$ | $\lambda$ | $\xi$   |
| NIGHT   | 23 <sup>00</sup> –0 <sup>00</sup>  |                |          |           |         |
|         | 0 <sup>00</sup> –1 <sup>00</sup>   | -0,2693        | 1,3600   | 1,3952    | 0,2171  |
|         | 1 <sup>00</sup> –2 <sup>00</sup>   | -0,0908        | 1,4205   | 1,3373    | -0,5533 |
|         | 2 <sup>00</sup> –3 <sup>00</sup>   |                |          |           |         |
|         | 3 <sup>00</sup> –4 <sup>00</sup>   |                |          |           |         |
|         | 4 <sup>00</sup> –5 <sup>00</sup>   |                |          |           |         |
|         | 5 <sup>00</sup> –6 <sup>00</sup>   |                |          |           |         |
|         | 6 <sup>00</sup> –7 <sup>00</sup>   |                |          |           |         |
| DAY     | 7 <sup>00</sup> –8 <sup>00</sup>   |                |          |           |         |
|         | 8 <sup>00</sup> –9 <sup>00</sup>   |                |          |           |         |
|         | 9 <sup>00</sup> –10 <sup>00</sup>  |                |          |           |         |
|         | 10 <sup>00</sup> –11 <sup>00</sup> | 0,0148         | 1,4280   | 1,0243    | 0,1644  |
|         | 11 <sup>00</sup> –12 <sup>00</sup> |                |          |           |         |
|         | 12 <sup>00</sup> –13 <sup>00</sup> |                |          |           |         |
|         | 13 <sup>00</sup> –14 <sup>00</sup> |                |          |           |         |
|         | 14 <sup>00</sup> –15 <sup>00</sup> | -0,3919        | 1,4836   | 1,1252    | -0,4351 |
|         | 15 <sup>00</sup> –16 <sup>00</sup> | 0,0263         | 1,3551   | 0,8980    | -0,6033 |
|         | 16 <sup>00</sup> –17 <sup>00</sup> |                |          |           |         |
| EVENING | 17 <sup>00</sup> –18 <sup>00</sup> |                |          |           |         |
|         | 18 <sup>00</sup> –19 <sup>00</sup> | -0,3565        | 1,2611   | 0,8688    | -0,5831 |
|         | 19 <sup>00</sup> –20 <sup>00</sup> | 0,0597         | 1,3422   | 0,9957    | 0,3442  |
|         | 20 <sup>00</sup> –21 <sup>00</sup> | -0,1034        | 1,2857   | 0,7540    | 0,1848  |
|         | 21 <sup>00</sup> –22 <sup>00</sup> |                |          |           |         |
|         | 22 <sup>00</sup> –23 <sup>00</sup> |                |          |           |         |

Tabla 5.2.9. Parámetros del ajuste a la distribución Johnson SU para cada una de las horas de la localización D correspondientes al año 2005.

|         |                                    | LOCALIZACION E |          |           |         |
|---------|------------------------------------|----------------|----------|-----------|---------|
|         |                                    | Parámetros     |          |           |         |
|         | Hora                               | $\gamma$       | $\delta$ | $\lambda$ | $\xi$   |
| NIGHT   | 23 <sup>00</sup> –0 <sup>00</sup>  | 0,1588         | 1,4667   | 1,6345    | 1,0360  |
|         | 0 <sup>00</sup> –1 <sup>00</sup>   | -0,2826        | 1,4122   | 1,3730    | 0,2697  |
|         | 1 <sup>00</sup> –2 <sup>00</sup>   | -0,5997        | 1,5125   | 1,1710    | -0,5668 |
|         | 2 <sup>00</sup> –3 <sup>00</sup>   | 0,0228         | 1,4697   | 1,2674    | -0,9868 |
|         | 3 <sup>00</sup> –4 <sup>00</sup>   | -0,0236        | 1,4397   | 1,3226    | -1,2915 |
|         | 4 <sup>00</sup> –5 <sup>00</sup>   | 0,2714         | 1,5168   | 1,3274    | -1,1677 |
|         | 5 <sup>00</sup> –6 <sup>00</sup>   |                |          |           |         |
|         | 6 <sup>00</sup> –7 <sup>00</sup>   | 1,5485         | 2,5520   | 3,0838    | 3,1682  |
| DAY     | 7 <sup>00</sup> –8 <sup>00</sup>   |                |          |           |         |
|         | 8 <sup>00</sup> –9 <sup>00</sup>   |                |          |           |         |
|         | 9 <sup>00</sup> –10 <sup>00</sup>  | 0,1192         | 4,2586   | 11,0910   | 0,2922  |
|         | 10 <sup>00</sup> –11 <sup>00</sup> | -0,4893        | 2,1052   | 4,3221    | -2,5430 |
|         | 11 <sup>00</sup> –12 <sup>00</sup> | -0,3882        | 1,8793   | 3,1624    | -2,5118 |
|         | 12 <sup>00</sup> –13 <sup>00</sup> |                |          |           |         |
|         | 13 <sup>00</sup> –14 <sup>00</sup> | 0,4573         | 2,7757   | 5,3592    | 0,6852  |
|         | 14 <sup>00</sup> –15 <sup>00</sup> |                |          |           |         |
|         | 15 <sup>00</sup> –16 <sup>00</sup> |                |          |           |         |
|         | 16 <sup>00</sup> –17 <sup>00</sup> |                |          |           |         |
|         | 17 <sup>00</sup> –18 <sup>00</sup> | 1,5288         | 2,7307   | 4,7730    | 2,1903  |
|         | 18 <sup>00</sup> –19 <sup>00</sup> |                |          |           |         |
| EVENING | 19 <sup>00</sup> –20 <sup>00</sup> | 0,1979         | 2,1065   | 2,6176    | 0,8762  |
|         | 20 <sup>00</sup> –21 <sup>00</sup> | 0,4502         | 1,4546   | 1,1536    | 0,4032  |
|         | 21 <sup>00</sup> –22 <sup>00</sup> | 0,5081         | 1,5379   | 1,4348    | 0,0271  |
|         | 22 <sup>00</sup> –23 <sup>00</sup> |                |          |           |         |

Tabla 5.2.10. Parámetros del ajuste a la distribución Johnson SU para cada una de las horas de la localización E correspondientes al año 2005.

En estas tablas los valores en blanco implican que para esa hora no se han superado los test de hipótesis simultáneamente. Asimismo, en las tablas 5.2.11, 5.2.12 y 5.2.13 se muestran los resultados para los parámetros de la distribución Johnson SU en la localización A en distintos años para cada una de las franjas horarias, de forma que puedan compararse si el ajuste a la distribución es similar en el resto de años. Se puede observar que, a pesar de existir diferencias en los parámetros para cada año están diferencias no son importantes, observándose que las funciones de distribuciones para cada año asemejan características similares (con alguna excepción), siendo las diferencias entre años mayores para la franja NIGHT como puede observarse a modo de ejemplo en la figura 5.2.7 para una hora específica dentro de cada franja horaria en la localización A. Este comportamiento es observado también en las otras localizaciones siendo mucho mas claro en la localización E, como puede observarse a partir de la figura 5.2.8 (especialmente en el período NIGHT y DAY).

A pesar de estas similitudes, si se compara dentro de un mismo año las distribuciones estadísticas de las horas correspondientes a la misma franja horaria (sobretudo para horas que son consecutivas) los resultados no son concluyentes, ya que a pesar de que alguna hora puede presentar similar función de distribución con otra, esto no se repite para las mismas horas comparadas en otros años, permaneciendo estas diferencias al realizar las comparaciones en las otras localizaciones. A modo de ejemplo, en la figura 5.2.9 se observan las distribuciones ajustadas para distintas horas en la franja horaria DAY correspondientes a la localización A en el año 2004. En esta figura parece que el ajuste es similar para las horas: 10:00h – 11:00h, 13:00h – 14:00h y 14:00h – 15:00h, siendo más o menos distintas para el resto de las horas.

|      |                                    | Parámetros Distribución Johnson SU |          |           |       |          |          |           |       |          |          |           |       |          |          |           |       |          |          |           |       |
|------|------------------------------------|------------------------------------|----------|-----------|-------|----------|----------|-----------|-------|----------|----------|-----------|-------|----------|----------|-----------|-------|----------|----------|-----------|-------|
|      |                                    | 2001                               |          |           |       | 2002     |          |           |       | 2003     |          |           |       | 2004     |          |           |       | 2005     |          |           |       |
| Hora |                                    | $\gamma$                           | $\delta$ | $\lambda$ | $\xi$ | $\gamma$ | $\delta$ | $\lambda$ | $\xi$ | $\gamma$ | $\delta$ | $\lambda$ | $\xi$ | $\gamma$ | $\delta$ | $\lambda$ | $\xi$ | $\gamma$ | $\delta$ | $\lambda$ | $\xi$ |
| DAY  | 7 <sup>00</sup> –8 <sup>00</sup>   | 1,50                               | 1,44     | 0,62      | 0,37  |          |          |           |       |          |          |           |       | 0,89     | 3,15     | 2,10      | -0,02 | 0,49     | 1,27     | 0,71      | -0,25 |
|      | 8 <sup>00</sup> –9 <sup>00</sup>   | 0,48                               | 1,25     | 0,96      | 0,24  |          |          |           |       |          |          |           |       | 0,02     | 2,37     | 2,11      | -0,32 | 0,02     | 1,40     | 1,13      | -0,16 |
|      | 9 <sup>00</sup> –10 <sup>00</sup>  |                                    |          |           |       |          |          |           |       | -2,01    | 2,58     | 1,87      | -1,31 | -0,96    | 2,30     | 2,31      | -0,76 |          |          |           |       |
|      | 10 <sup>00</sup> –11 <sup>00</sup> |                                    |          |           |       |          |          |           |       | -0,43    | 1,65     | 0,95      | 0,10  | -0,06    | 1,90     | 1,38      | 0,21  |          |          |           |       |
|      | 11 <sup>00</sup> –12 <sup>00</sup> | 0,17                               | 1,05     | 0,60      | 0,40  |          |          |           |       | -1,31    | 3,07     | 1,46      | -0,58 | 0,01     | 1,98     | 1,01      | 0,26  |          |          |           |       |
|      | 12 <sup>00</sup> –13 <sup>00</sup> |                                    |          |           |       |          |          |           |       | -1,02    | 1,76     | 0,91      | -0,53 |          |          |           |       |          |          |           |       |
|      | 13 <sup>00</sup> –14 <sup>00</sup> | 0,33                               | 1,15     | 0,68      | 0,21  | -0,25    | 1,44     | 0,94      | -0,20 | -0,61    | 1,88     | 1,22      | -0,34 | 0,36     | 3,29     | 2,33      | 0,33  |          |          |           |       |
|      | 14 <sup>00</sup> –15 <sup>00</sup> | 0,02                               | 1,80     | 1,32      | -0,12 | 0,73     | 2,02     | 1,36      | 0,39  |          |          |           |       | -0,14    | 1,58     | 1,18      | -0,02 | -0,19    | 1,62     | 1,11      | -0,22 |
|      | 15 <sup>00</sup> –16 <sup>00</sup> | -0,35                              | 1,44     | 0,93      | -0,70 | 0,44     | 1,73     | 1,00      | -0,18 |          |          |           |       | -0,38    | 1,63     | 1,17      | -0,92 | 0,06     | 1,60     | 0,99      | -0,46 |
|      | 16 <sup>00</sup> –17 <sup>00</sup> | -0,39                              | 1,32     | 0,80      | -0,64 | -0,22    | 1,31     | 0,71      | -0,53 | -0,44    | 1,80     | 0,85      | -0,51 | -0,66    | 1,32     | 0,53      | -0,66 | 0,00     | 1,60     | 0,91      | -0,39 |
|      | 17 <sup>00</sup> –18 <sup>00</sup> |                                    |          |           |       | -0,09    | 1,16     | 0,71      | -0,29 |          |          |           |       |          |          |           |       | 0,13     | 1,63     | 1,04      | -0,25 |
|      | 18 <sup>00</sup> –19 <sup>00</sup> | 0,40                               | 1,26     | 0,97      | -0,15 |          |          |           |       |          |          |           |       | 0,25     | 1,42     | 1,47      | -0,25 | 0,22     | 1,98     | 1,54      | -0,21 |

Tabla 5.2.11. Parámetros del ajuste a la distribución estadística Johnson SU en distintos años para la localización A en la franja horaria DAY.

|       |                                   | Parámetros Distribución Johnson SU |          |           |       |          |          |           |       |          |          |           |       |          |          |           |       |          |          |           |       |
|-------|-----------------------------------|------------------------------------|----------|-----------|-------|----------|----------|-----------|-------|----------|----------|-----------|-------|----------|----------|-----------|-------|----------|----------|-----------|-------|
|       |                                   | 2001                               |          |           |       | 2002     |          |           |       | 2003     |          |           |       | 2004     |          |           |       | 2005     |          |           |       |
| Hora  |                                   | $\gamma$                           | $\delta$ | $\lambda$ | $\xi$ | $\gamma$ | $\delta$ | $\lambda$ | $\xi$ | $\gamma$ | $\delta$ | $\lambda$ | $\xi$ | $\gamma$ | $\delta$ | $\lambda$ | $\xi$ | $\gamma$ | $\delta$ | $\lambda$ | $\xi$ |
| NIGHT | 23 <sup>00</sup> –0 <sup>00</sup> |                                    |          |           |       |          |          |           |       | 1,39     | 1,81     | 1,22      | 2,62  | 1,18     | 1,85     | 1,18      | 2,35  | 0,81     | 1,70     | 1,19      | 1,80  |
|       | 0 <sup>00</sup> –1 <sup>00</sup>  | -0,21                              | 2,50     | 1,70      | 0,73  |          |          |           |       |          |          |           |       |          |          |           |       |          |          |           |       |
|       | 1 <sup>00</sup> –2 <sup>00</sup>  | -1,03                              | 1,25     | 0,42      | -0,32 | 0,04     | 1,61     | 0,86      | 0,13  | -0,65    | 3,30     | 1,93      | -0,35 | 0,77     | 2,37     | 1,29      | -0,38 | -0,79    | 1,96     | 0,89      | -0,26 |
|       | 2 <sup>00</sup> –3 <sup>00</sup>  |                                    |          |           |       |          |          |           |       |          |          |           |       |          |          |           |       |          |          |           |       |
|       | 3 <sup>00</sup> –4 <sup>00</sup>  |                                    |          |           |       |          |          |           |       |          |          |           |       |          |          |           |       |          |          |           |       |
|       | 4 <sup>00</sup> –5 <sup>00</sup>  |                                    |          |           |       |          |          |           |       |          |          |           |       |          |          |           |       |          |          |           |       |
|       | 5 <sup>00</sup> –6 <sup>00</sup>  |                                    |          |           |       |          |          |           |       |          |          |           |       |          |          |           |       | -1,02    | 1,78     | 0,98      | -2,03 |
|       | 6 <sup>00</sup> –7 <sup>00</sup>  |                                    |          |           |       |          |          |           |       |          |          |           |       |          |          |           |       |          |          |           |       |

Tabla 5.2.12. Parámetros ajuste a la distribución estadística Johnson SU en distintos años para la localización A en la franja horaria NIGHT.

|         |                                    | Parámetros Distribución Johnson SU |          |           |       |          |          |           |       |          |          |           |       |          |          |           |       |          |          |           |       |
|---------|------------------------------------|------------------------------------|----------|-----------|-------|----------|----------|-----------|-------|----------|----------|-----------|-------|----------|----------|-----------|-------|----------|----------|-----------|-------|
|         |                                    | 2001                               |          |           |       | 2002     |          |           |       | 2003     |          |           |       | 2004     |          |           |       | 2005     |          |           |       |
| Hora    |                                    | $\gamma$                           | $\delta$ | $\lambda$ | $\xi$ | $\gamma$ | $\delta$ | $\lambda$ | $\xi$ | $\gamma$ | $\delta$ | $\lambda$ | $\xi$ | $\gamma$ | $\delta$ | $\lambda$ | $\xi$ | $\gamma$ | $\delta$ | $\lambda$ | $\xi$ |
| EVENING | 19 <sup>00</sup> –20 <sup>00</sup> | 0,13                               | 1,48     | 0,88      | 0,06  | -0,09    | 1,52     | 0,87      | 0,07  |          |          |           |       | -1,23    | 1,73     | 1,10      | -1,11 | 0,07     | 1,40     | 0,79      | 0,18  |
|         | 20 <sup>00</sup> –21 <sup>00</sup> | 0,81                               | 1,42     | 0,68      | 0,46  | 0,11     | 1,35     | 0,68      | 0,08  | 0,11     | 1,28     | 0,65      | 0,01  | 0,06     | 1,59     | 0,95      | -0,05 | 0,41     | 1,43     | 0,68      | 0,38  |
|         | 21 <sup>00</sup> –22 <sup>00</sup> | 0,18                               | 1,55     | 0,80      | 0,17  |          |          |           |       | 0,31     | 1,52     | 0,74      | 0,31  |          |          |           |       | 0,24     | 2,15     | 1,06      | 0,13  |
|         | 22 <sup>00</sup> –23 <sup>00</sup> | -0,06                              | 1,62     | 0,99      | -0,24 |          |          |           |       |          |          |           |       |          |          |           |       | 0,10     | 1,22     | 0,64      | -0,43 |

Tabla 5.2.13. Parámetros ajuste a la distribución estadística Johnson SU en distintos años para la localización A en la franja horaria EVENING.

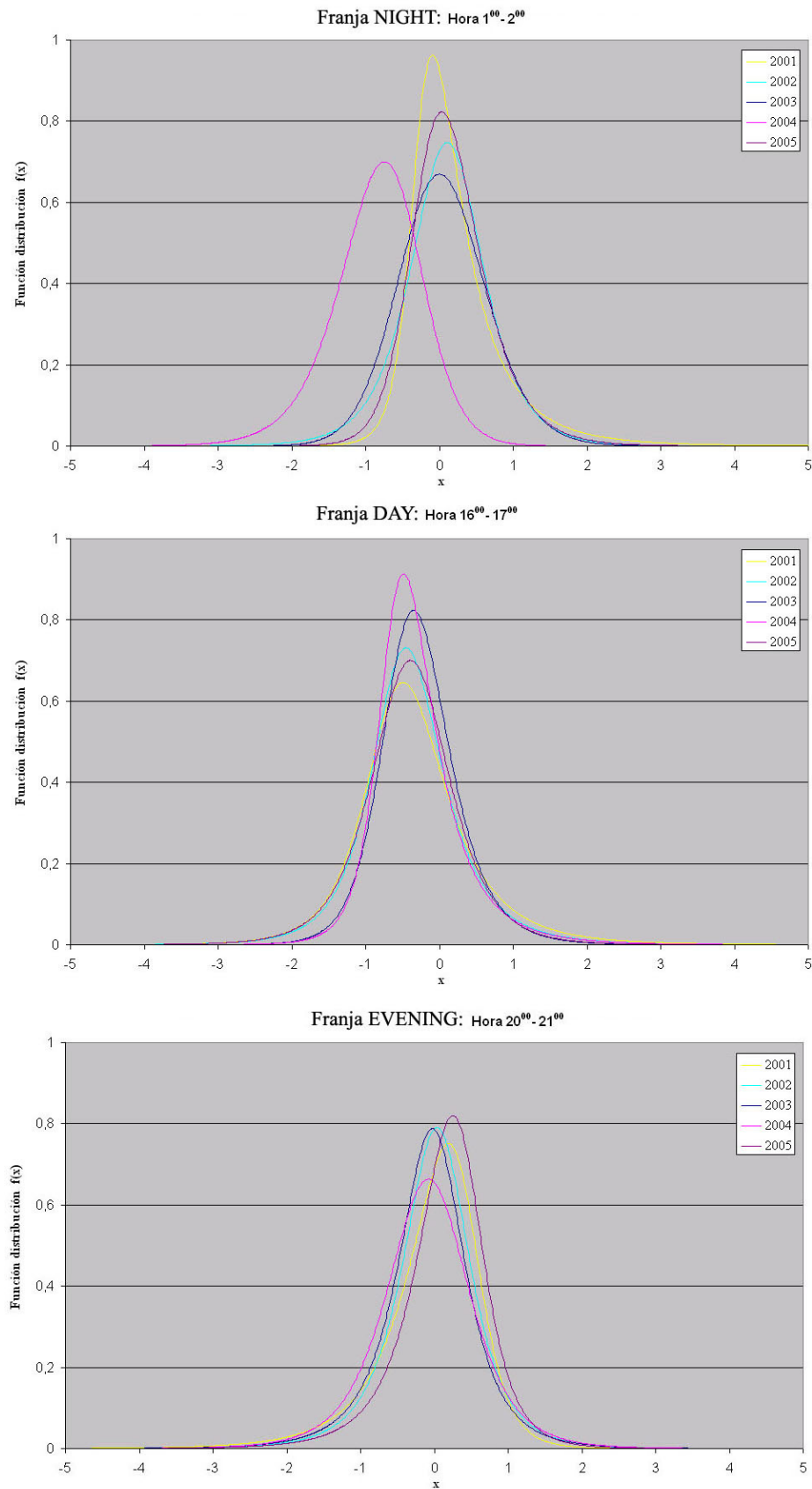


Figura 5.2.7. Ajuste a la distribución empírica Johnson SU para una hora específica dentro de cada período horario en la localización A y en distintos años.

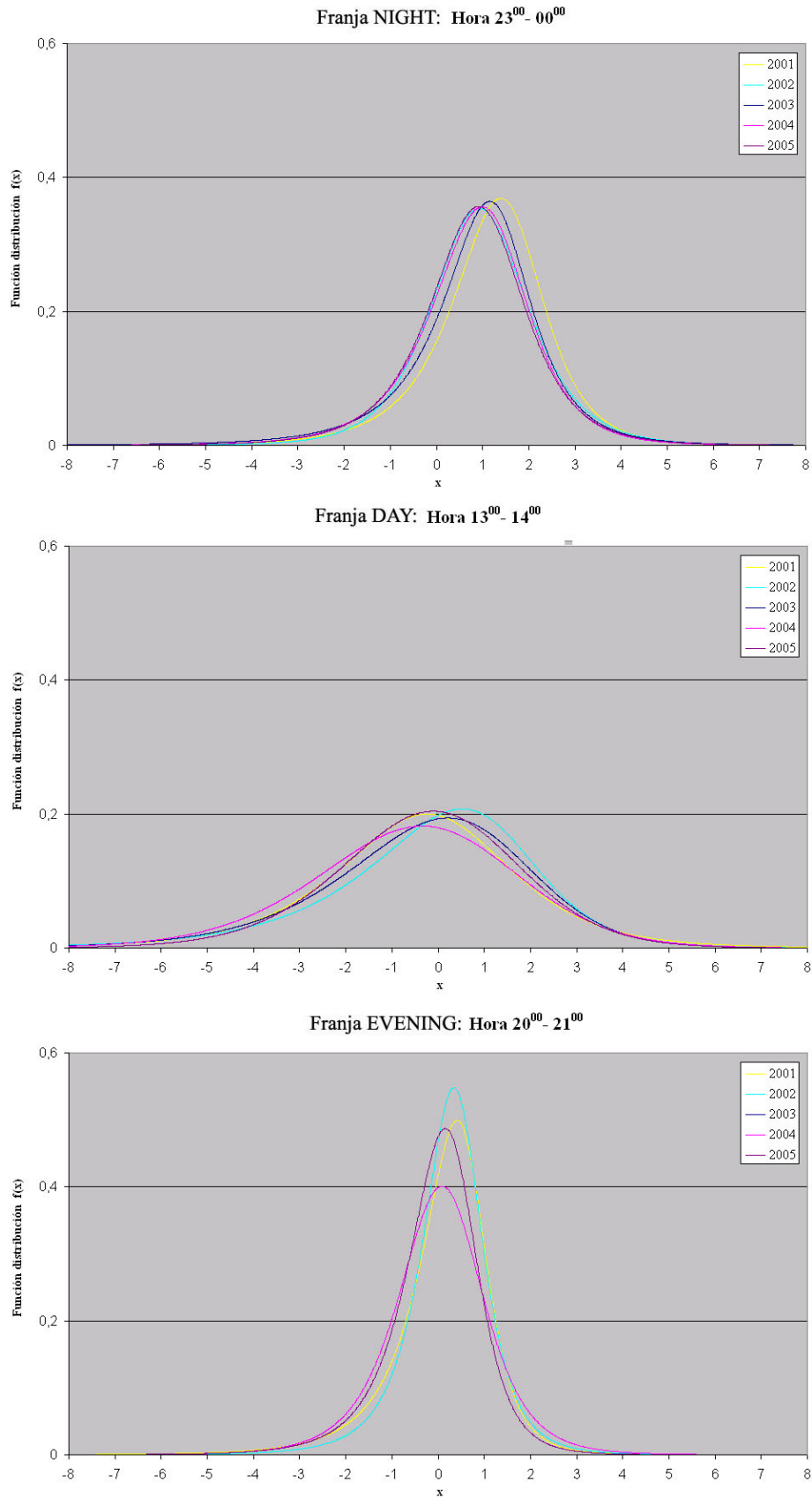


Figura 5.2.8. Ajuste a la distribución empírica Johnson SU para una hora específica dentro de cada período horario en la localización E y en distintos años.



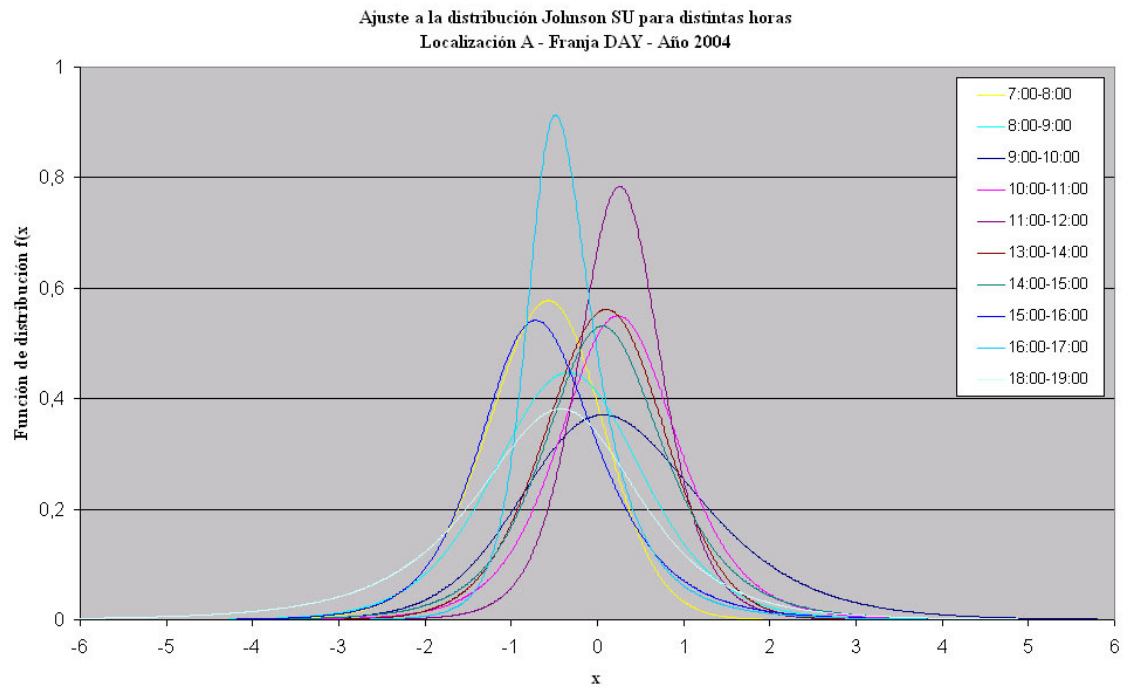


Figura 5.2.9. Ajuste a distribuciones estadísticas Johnson SU de distintas horas dentro de la franja DAY en el año 2004 para la localización A.

### 5.3 MODELO MATEMÁTICO DE SERIE TEMPORAL

#### 5.3.1 INTRODUCCIÓN

En general, la realización de predicciones precisas de niveles sonoros ambientales entraña bastante dificultad. En referencia a modelos matemáticos que intenten predecir dichos niveles sonoros los estudios previos se podrían dividir en dos clases: En la primera clase, los niveles sonoros son determinados en función de las condiciones de tráfico [51-61], como por ejemplo, número y tipo de vehículos, velocidad del vehículo, frecuencia de paso, etc., de forma que se desarrollan expresiones matemáticas teniendo en cuenta todos estos factores. En la otra parte encontraríamos estudios alternativos [62-66] basados en la estimación de los estadísticos de los niveles sonoros con el objetivo principal de obtener su distribución estadística y los intervalos de confianza.

En todos estos estudios, el objetivo es predecir el error para períodos de tiempo más cortos que el período de medida, o bien obtener el correspondiente tiempo de medida para la determinación del nivel sonoro equivalente (de duración específica) con un determinado margen de error. Si bien, en la mayoría de estos estudios los períodos de tiempo evaluados son cortos (períodos de una hora y tiempos de muestreo para las estimaciones de varios minutos), siendo la causa el alto coste, tanto económico como humano, de estimar niveles sonoros para períodos de larga duración que puede implicar la medición de niveles sonoros en varios años. Es por esto que pocos estudios [19, 20, 41] se han desarrollado en base al análisis de series temporales. En estos, el ajuste matemático ha sido realizado en base a modelos ARIMA. En general, cuando una variable cambia en función del tiempo (en nuestro caso los niveles sonoros diarios) se dice que sigue un proceso estocástico y normalmente se utilizan las aproximaciones

estocásticas cuando no se conoce la física subyacente o el proceso está afectado por ruido, es decir, el proceso está enmascarado. Los métodos estocásticos son usados con frecuencia en otras disciplinas científicas como modelos financieros, modelos físicos y en ciencias naturales. Para nuestro caso, se propone un modelo estocástico que explique las variaciones temporales en los niveles sonoros y las diferencias en la volatilidad y velocidad de reversión a la media para cada día de la semana correspondiente a períodos de larga duración.

Como en los anteriores apartados, los ajustes al modelo matemático planteado han sido realizados para cada uno de los niveles sonoros y en cada una de las localizaciones, ahora bien, en este apartado, y para una mejor comprensión se procederá primero a explicar el modelo desarrollado sobre una localización en particular, la localización A, para posteriormente, mostrar y comparar los modelos para el resto de localizaciones. Es por ello que la estructura de desarrollo de este apartado es la siguiente: en la sección 5.3.2 se presenta el modelo estocástico propuesto (modelo Ornstein-Uhlenbeck) para describir las variaciones en los niveles sonoros. El ajuste de este modelo para cada nivel sonoro ( $L_{DEN}$ ,  $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$  y  $L_{NIGHT}$ ) en la localización A se realiza en la sección 5.3.3, mientras que la muestra y comparación de resultados para todas las localizaciones se realiza en la sección 5.3.4.

### 5.3.2 MODELO PARA LOS NIVELES SONOROS.

#### 5.3.2.1. Modelo determinista

Del análisis de los datos de niveles sonoros se podía observar que existe una fuerte variación estacional en los niveles sonoros. Los niveles sonoros diarios ( $L_{DEN}$ ,  $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$  o  $L_{NIGHT}$ ) parece que varían alrededor de la media anual durante el verano y el invierno [17, 18, 22, 67]. Como primera aproximación se podría modelar la dependencia estacional con, por ejemplo, una función seno,  $\sin(\omega t + \phi)$ , donde  $t$  denota el tiempo, medido en días. Nosotros tendremos  $t = 1, 2, \dots$  para denotar 1 Enero, 2 de Enero,...y así sucesivamente. Sabiendo que el período de las oscilaciones es un año (y descartando años bisiestos) se tiene  $\omega = \frac{2\pi}{365}$ . Y como el mínimo ó máximo nivel normalmente no ocurren el 1 de enero o el 1 de julio, respectivamente, se ha introducido un ángulo de desfase,  $\phi$ . Es más, incluso una posible tendencia lineal en los datos podría ser incluida, aunque pueda ser pequeña, pero podría existir. Esta tendencia podía haber sido de tipo polinomial, pero debido a su pequeño efecto en la dinámica general de la media de los niveles sonoros, es sólo el término lineal, del polinomio, el que dominará. Asimismo, se han incluido variables dummy en nuestro modelo en dos sentidos. En un sentido para controlar eventos periódicos que se repiten a lo largo de los años, como por ejemplo las festividades locales, períodos de navidad o el verano. Por el otro sentido, las variables dummy han sido incluidas para evitar la presencia de anómalos en los datos que podrían enmascarar el cálculo del modelo, como por ejemplo el efecto de obras en la vía pública. Una variable dummy,  $S_{i,j,t}$ , toma el valor 0 ó 1 dependiendo del día seleccionado para esa variable. Juntando todas estas consideraciones, un modelo

determinista para la media de los niveles sonoros en un determinado día  $t$ ,  $L_{i,t}^e$ , (donde el índice  $i$  denota DEN, DAY, EVENING o NIGHT, dependiendo del nivel sonoro estimado) tendrá la forma:

$$L_{i,t}^e = A_i + B_i t + C_i \sin(\omega t + \varphi_i) + \sum_{j=1}^{j=n} \beta_{i,j} \cdot S_{i,j,t} \quad (1)$$

donde los parámetros  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $C_i$ ,  $\varphi_i$  y cada  $\beta_{i,j}$  tienen que ser elegidos de forma que la curva se ajuste bien a los datos. Adicionalmente y para posibles diferencias en el parámetro  $A$  para cada uno de los días se han añadido variables dummy adicionales para cada día desde el martes hasta el domingo ( $\beta_{i,T}$ ,  $\beta_{i,W}$ ,  $\beta_{i,TH}$ ,  $\beta_{i,F}$ ,  $\beta_{i,SA}$ ,  $\beta_{i,SU}$ ), para el caso en que estas diferencias puedan ser significativas (consideración que será mostrada en la sección de resultados). De esta forma, el parámetro  $A_i$  del modelo determinista presentado tiene como referencia el nivel sonoro del lunes. Un buen modelo determinista es aquel que contenga las menos variables dummy posibles. En adelante, se ha omitido el índice  $i$  de la notación (en referencia a cada uno de los niveles), mostrándose, posteriormente y de forma separada, los valores de los parámetros para cada nivel sonoro en la sección de resultados.

### 5.3.2.2. Volatilidad

Desafortunadamente, los niveles sonoros no son deterministas y para obtener un modelo más realista es necesario introducir algo de ruido al modelo determinista (Ec. (1)), como por ejemplo, teniendo en cuenta la volatilidad diaria,  $\sigma_t$ . Una elección es un proceso de Wiener [68] ( $W_t, t \geq 0$ ), el cual es razonable, atendiendo al trato matemático del problema. Un análisis más cuidadoso de la serie de datos, revela que existe una autocorrelación semanal para los datos (el nivel del lunes, depende del lunes anterior, el del martes del martes anterior y así sucesivamente) como puede observarse en la figura 5.3.1 para los datos correspondientes al nivel  $L_{DAY}$ . De esta forma se asume que la volatilidad es una función constante que toma un determinado valor constante para cada día, donde  $(\sigma_\mu)_{\mu=1}^7$  son constantes positivas. De esta forma el proceso que explicaría las variaciones en los niveles sonoros sería  $(\sigma_t W_t, t \geq 0)$ .

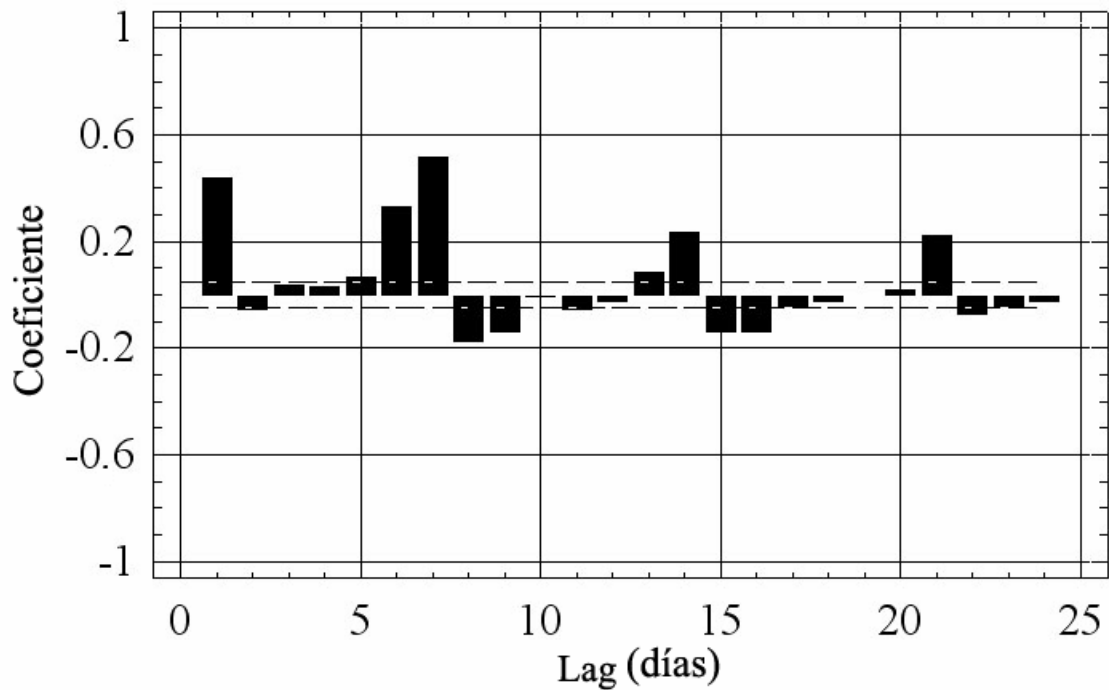


Figura 5.3.1. Gráfica de autocorrelación para el nivel  $L_{DAY}$  en la localización A.

### 5.3.2.3. Reversión a la media

Asimismo, se sabe que los niveles sonoros no pueden, por ejemplo, aumentar día tras día por largos períodos de tiempo. Esto significa que el modelo no debería permitir a los niveles sonoros desviarse de su valor medio más allá de períodos cortos de tiempo, es decir, la predicción de los niveles sonoros debería tener una propiedad de reversión a la media. Combinando todas las consideraciones el nivel sonoro se modela a partir de la siguiente ecuación diferencial estocástica:

$$dL_t = a[L_t^e - L_t]dt + \sigma_t dW_t \quad (2)$$

Donde el primer coeficiente  $a \in R$ , determina la velocidad de reversión a la media. La solución de esta ecuación es denominada un proceso de Ornstein-Uhlenbeck [69, 70].

No obstante, la ecuación (2) no está revirtiendo a  $L_t^e$  para períodos de larga duración (consultar por ejemplo referencias [71 – 75]), y es necesario añadir un término “extra” determinista al primer término de la ecuación para obtener un proceso que realmente revierta a la ecuación (1):

$$\frac{dL_t^e}{dt} = Bt + \omega C \sin(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

Este término “extra” ajusta al primer término, de forma que la solución de la ecuación diferencial estocástica tienda a  $L_t^e$  (ya que el nivel sonoro  $L_t^e$  no es constante).

Comenzando en  $L_s = x$  se tiene el siguiente modelo para los niveles sonoros:

$$dL_t = \left\{ \frac{dL_t^e}{dt} + a[L_t^e - L_t] \right\} dt + \sigma_t dW_t \quad t > s \quad (4)$$

cuya solución es:

$$L_t = (x - L_s^e)e^{-a(t-s)} + L_t^e + \int_s^t e^{-a(t-x)} \sigma_x dW_x \quad (5)$$

donde  $L_t^e$  viene dado por la ecuación (1).



#### 5.3.2.4. Estimación de parámetros

En esta sección se estimarán los parámetros desconocidos  $A, B, C, \varphi, \beta_j, \sigma, a$  de las ecuaciones (1) y (2). Primero, para encontrar los valores de las constantes del modelo determinista se ajusta la función:

$$Z_t = b_0 + b_1 \cdot t + b_2 \cdot \sin(\omega t) + b_3 \cdot \cos(\omega t) + \beta_1 \cdot S_{1,t} + \beta_2 \cdot S_{2,t} + \dots + \beta_n \cdot S_{n,t} \quad (6)$$

a los datos de los niveles sonoros utilizando el método de los mínimos cuadrados. De esta forma se debe encontrar el vector  $\xi = [b_0, b_1, b_2, b_3, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n]$  que cumpla:

$$\min_{\xi} \|Z - X\|^2 \quad (7)$$

donde  $Z$  es el vector con los elementos de (6) y  $X$  es el vector de datos. Las constantes de la ecuación (1), son, entonces, obtenidas a partir de:

$$\begin{aligned} A &= b_0 \\ B &= b_1 \\ C &= \sqrt{b_2^2 + b_3^2} \\ \varphi &= \arctan\left(\frac{b_3}{b_2}\right) \\ \beta_j &= \beta_j \end{aligned} \quad (8)$$

Luego, para obtener la volatilidad de cada día,  $\sigma_\mu$ , a partir de los datos se desarrollan dos métodos a partir de los datos de cada día. El primer método para calcular la

volatilidad de un día específico,  $\sigma_\mu$ , se basa en la variación cuadrática de los niveles sonoros a lo largo del día,  $L_j$ , (consultar Basawa y Rao [76]):

$$\sigma_\mu^2 = \frac{1}{N_\mu} \sum_{j=0}^{N_\mu} (L_{j+1} - L_j)^2 \quad (9)$$

donde  $N_\mu$  representa el número total de días.

El segundo método de calculo se deriva de la discretización de la ecuación (4) y asumiendo que la ecuación resultante es una regresión. De esta forma, durante un determinado día  $\mu$ , la ecuación discretizada puede escribirse como:

$$L_j = L_j^e - L_{j-1}^e + a_\mu \cdot L_{j-1}^e + (1 - a_\mu) L_j + \sigma_\mu \varepsilon_j \quad j = 1, \dots, N_\mu \quad (10)$$

donde  $\{\varepsilon_j\}_{j=1}^{N_\mu-1}$  es una variable independiente e idénticamente distribuida.

Con  $\hat{L}_j = L_j - (L_j^e - L_{j-1}^e)$  la ecuación (10) se puede escribir como:

$$\hat{L}_j = a_\mu \cdot L_{j-1}^e + (1 - a_\mu) L_{j-1} + \sigma_\mu \varepsilon_j \quad (11)$$

la cual puede ser vista como una regresión del nivel sonoro del día de hoy respecto al día de la semana anterior. Así, un estimador eficiente de  $\sigma_\mu$  es (consultar Brockwell y Davis [50]):

$$\hat{\sigma}_\mu^2 = \frac{1}{N_\mu - 2} \sum_{j=1}^{N_\mu} [\hat{L}_j - \hat{a}_\mu L_{j-1}^e + (1 - \hat{a}_\mu) L_{j-1}]^2 \quad (12)$$

De esta forma, en el segundo método es necesario calcular primero el parámetro de reversión a la media,  $a_\mu$ , para encontrar el valor de la volatilidad,  $\sigma_\mu$ . Para este calculo, el parámetro de reversión a la media se determina aplicando el método de los mínimos cuadrados al ajuste de una regresión lineal a la ecuación (11).

Por último, se determina la velocidad de reversión a la media para el método 1. Como el tiempo entre las observaciones de los niveles sonoros es distinto de cero, es apropiado estimar el parámetro de reversión a la media utilizando el método de funciones de estimación de la martingala desarrollado por Bibby y Sørensen [77]. Basándose el las observaciones recogidas durante  $N_\mu$  días, un estimador eficiente de  $a_\mu$  es obtenido como el cero de la ecuación  $G_N(a_\mu) = 0$ , donde:

$$G_N(a_\mu) = \sum_{j=1}^{N_\mu} \frac{b'(L_{j-1}; a_\mu)}{\sigma_{\mu, j-1}^2} [L_j - E(L|L_{j-1})]$$

donde  $b'$  denota la derivada respecto de  $a_\mu$  del primer término en la ecuación (4).

Entonces, sólo se debe determinar cada uno de los términos  $[L_j - E(L|L_{j-1})]$  resolviendo a partir de la ecuación (11). De esta forma:

$$G_N(a_\mu) = \sum_{j=1}^{N_\mu} \frac{L_j^e - L_{j-1}}{\sigma_{\mu, j-1}^2} [L_j - (L_{j-1} - L_{j-1}^e)e^{-a_\mu} - L_j^e] \quad (13)$$

a partir de la cual es posible comprobar que:

$$a_{\mu} = -\log \left( \frac{\sum_{j=1}^{N_{\mu}} \frac{L_{j-1}^e - L_{j-1}}{\sigma_{\mu,j-1}^2} (L_j - L_j^e)}{\sum_{j=1}^{N_{\mu}} \frac{L_{j-1}^e - L_{j-1}}{\sigma_{\mu,j-1}^2} (L_{j-1} - L_{j-1}^e)} \right) \quad (14)$$

Introduciendo en esta ecuación los valores numéricos obtenidos para la volatilidad por la ecuación (9) se obtiene el parámetro de reversión a la media del primer método de cálculo.

### 5.3.2.5. Procedimiento de cálculo

Se parte de un vector de datos que contiene (para cada nivel sonoro) los niveles diarios correspondientes a 5 años. A este vector de datos se le denominará como  $D_t$  ( $t = 1, 2, 3, \dots, 1827$  datos). Con la ayuda de programas informáticos (para la aplicación del método de mínimos cuadrados) se obtiene el vector de parámetros  $\xi = [b_0, b_1, b_2, b_3, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n]$ , calculándose los parámetros de la ecuación (1) utilizando la ecuación (8). De esta forma se tiene definido el modelo determinista.

A partir de aquí se determinan la volatilidad y la reversión a la media. Dando valores  $t = 1, 2, \dots, 1827$  al modelo determinista,  $L_t^e$ , se obtiene el vector discreto de datos,  $D_t^e$  ( $t = 1, 2, 3, \dots, 1827$ ) que contiene los datos estimados deterministas. A partir de aquí se selecciona un día determinado de la semana para el cálculo de las volatilidades y reversión a la media, repitiéndose esta operación para el resto de los días de la semana de forma separada. De esta forma las series de datos  $L_j$  y  $L_j^e$  contendrán solo los niveles sonoros correspondientes al día de la semana para el cuál se está realizando el cálculo. A partir de los vectores de datos, se obtienen estas series a partir de:

$$L_j = D_{(j+\mu-1)+7 \cdot (j-1)} \quad L_j^e = D_{(j+\mu-1)+7 \cdot (j-1)}^e \quad (15)$$

Por el método 1, con las series de datos  $L_j$  y  $L_j^e$  y empleando la ecuación (9) se obtiene la volatilidad,  $\sigma_\mu$ , y utilizando este valor en la ecuación (14) se obtiene el parámetro de reversión a la media  $a_\mu$ .

Utilizando el método 2, se calcula primero las variables de datos:

$$Y_j = (L_j - L_j^e) - (L_{j-1} - L_{j-1}^e) \quad \text{y} \quad X_j = -(L_{j-1} - L_{j-1}^e) \quad (16)$$

Calculando la regresión lineal entre estas dos variables ( $Y_j$ ,  $X_j$ ) se obtiene el parámetro de reversión a la media de la ecuación 11. Esta regresión es la ecuación:

$$Y_j = a_\mu \cdot X_j + u_j \rightarrow (u_j = \sigma_j \cdot \varepsilon_j) \quad (17)$$

Finalmente se reemplaza el valor de  $a_\mu$ , en la ecuación 12 para obtener la volatilidad,  $\sigma_\mu$ , por el método 2. No obstante, el procedimiento de cálculo seguido se muestra de forma gráfica en el esquema dado por la figura 5.3.2:

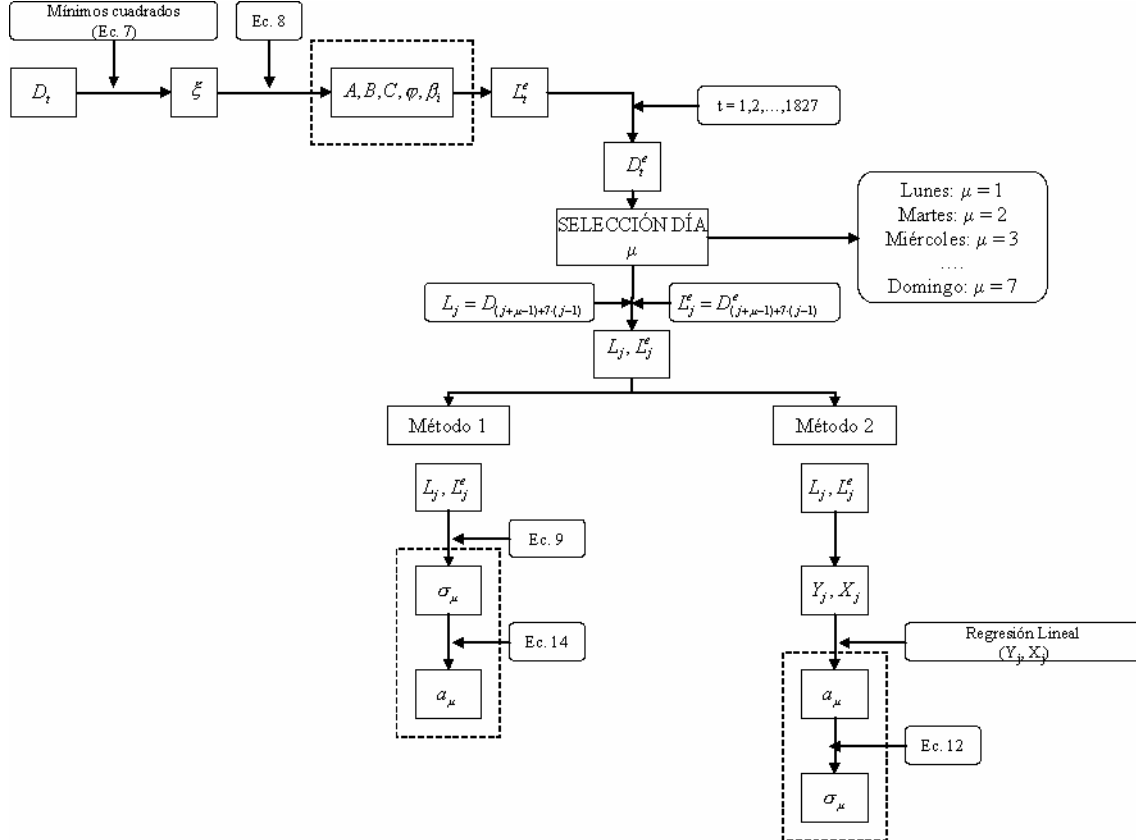


Figura 5.3.2. Esquema de procedimiento de cálculo del modelo.

### 5.3.3 RESULTADOS DEL MODELO EN LA LOCALIZACIÓN A

Para la localización A, los resultados del modelo determinista, para cada nivel sonoro, se muestran en la tabla 5.3.1, tomando como referencia (para el parámetro A) el lunes. Las variables dummy utilizadas,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ , son debidas a festivos y días de Navidad respectivamente. El parámetro  $R^2$  es el valor del coeficiente de correlación del modelo determinista. Se encuentra, que el parámetro A depende del día seleccionado, especialmente si el día seleccionado es el sábado o el domingo (días correspondiente a los fines de semana), de la misma forma que, en función del nivel sonoro seleccionado, existen más o menos diferencias en los parámetros entre cada uno de los días de la semana.

| Nivel         | Modelo determinista (dB)                                      | Dummy (dB) |           | $R^2$  |
|---------------|---|------------|-----------|--------|
|               |   | $\beta_1$  | $\beta_2$ |        |
| $L_{DEN}$     | $74,10 - 0,00028 \cdot t + 0,8089 \cdot sen(\omega t + 1,24)$ | -0,27      | -2,33     | 0,7397 |
| $L_{DAY}$     | $71,12 - 0,00035 \cdot t + 0,8544 \cdot sen(\omega t + 1,33)$ | -2,59      | -2,50     | 0,8027 |
| $L_{EVENING}$ | $69,71 - 0,00027 \cdot t + 0,8282 \cdot sen(\omega t + 1,17)$ | -1,03      | -2,47     | 0,6206 |
| $L_{NIGHT}$   | $66,28 - 0,00027 \cdot t + 0,7843 \cdot sen(\omega t + 1,22)$ | 0,61       | -2,25     | 0,7977 |

Tabla 5.3.1. Modelo determinista para los niveles sonoros en la localización A.

Por ejemplo, para los niveles  $L_{DAY}$  y  $L_{EVENING}$ , existe una diferencia estadísticamente significativa para la constante A entre los fines de semana y los días de la semana laborables de lunes a viernes. Para los días de lunes a viernes, comparativamente, no existen diferencias importantes. Sin embargo, para los niveles  $L_{NIGHT}$  y  $L_{DEN}$  existen diferencias estadísticamente significativas para todos los días de la semana con la excepción del lunes y el martes, tal y como puede observarse en la tabla 5.3.2 que contiene las diferencias en el parámetro A, del modelo determinista, para cada uno de

los días de la semana. Sin embargo, se debe remarcar que estas diferencias son pequeñas, y a pesar de que estadísticamente presentan diferencias significativas, en un sentido práctico, aparentemente son insignificantes. En general la mayor diferencia ocurre en los fines de semana.

| Parámetro A (dB)                   |           |         |           |         |               |         |             |         |
|------------------------------------|-----------|---------|-----------|---------|---------------|---------|-------------|---------|
| Día                                | $L_{DEN}$ | t-value | $L_{DAY}$ | t-value | $L_{EVENING}$ | t-value | $L_{NIGHT}$ | t-value |
| Lunes                              | 74,10     | 1900    | 71,12     | 1403    | 69,71         | 1331    | 66,28       | 1440    |
| Diferencia respecto del Lunes (dB) |           |         |           |         |               |         |             |         |
| Martes, $\beta_T$                  | -0,06     | -1,39   | -0,06     | -1,10   | +0,03         | +0,48   | -0,09       | -1,76   |
| Miércoles, $\beta_W$               | +0,19     | +4,26   | -0,04     | -0,65   | -0,01         | -0,17   | +0,39       | +7,25   |
| Jueves, $\beta_{TH}$               | +0,35     | +7,76   | -0,08     | -1,30   | -0,06         | -0,98   | +0,68       | +12,6   |
| Viernes, $\beta_F$                 | +0,88     | +19,2   | -0,19     | -3,24   | -0,04         | -0,586  | +1,54       | +28,5   |
| Sábado, $\beta_{SA}$               | +1,01     | +22,0   | -1,82     | -30,5   | -0,66         | -10,7   | +2,23       | +41,5   |
| Domingo, $\beta_{SU}$              | +0,91     | +19,9   | -2,72     | -45,4   | -0,71         | -11,5   | +2,28       | +42,0   |

Tabla 5.3.2. Diferencia en el parámetro A, del modelo determinista, para cada día de la semana respecto del nivel del lunes en la localización A.

Para el resto de parámetros  $B$ ,  $C$  y  $\varphi$ , se puede observar que los valores son muy parecidos al comparar los modelos de los distintos niveles sonoros. Por último, en relación al efecto de la variable dummy correspondiente a los días festivos,  $\beta_1$ , se observa que esta toma distinto valor dependiendo del nivel sonoro seleccionado: para  $L_{DEN}$ ,  $L_{DAY}$  y  $L_{EVENING}$  el nivel sonoro se incrementaría, mientras que para el nivel  $L_{NIGHT}$  el nivel sonoro decrecería. Por contra, el efecto de los días de Navidad,  $\beta_2$ , es prácticamente idéntico para cada uno de los niveles sonoros evaluados. Tomando en cuenta estas consideraciones, en la figura 5.3.3, y a modo de ejemplo, se muestra el ajuste del modelo determinista para el nivel  $L_{DEN}$  en el año 2004.



Para la volatilidad y la velocidad de reversión a la media, los valores obtenidos vienen mostrados en las tablas 5.3.3, 5.3.4, 5.3.5 y 5.3.6 para cada uno de los niveles sonoros. En estas tablas las últimas dos columnas muestran la media de la volatilidad y velocidad de reversión a la media obtenida por ambos métodos. De la misma forma, la última fila muestra la media de la volatilidad y velocidad de reversión de todos los días de la semana.

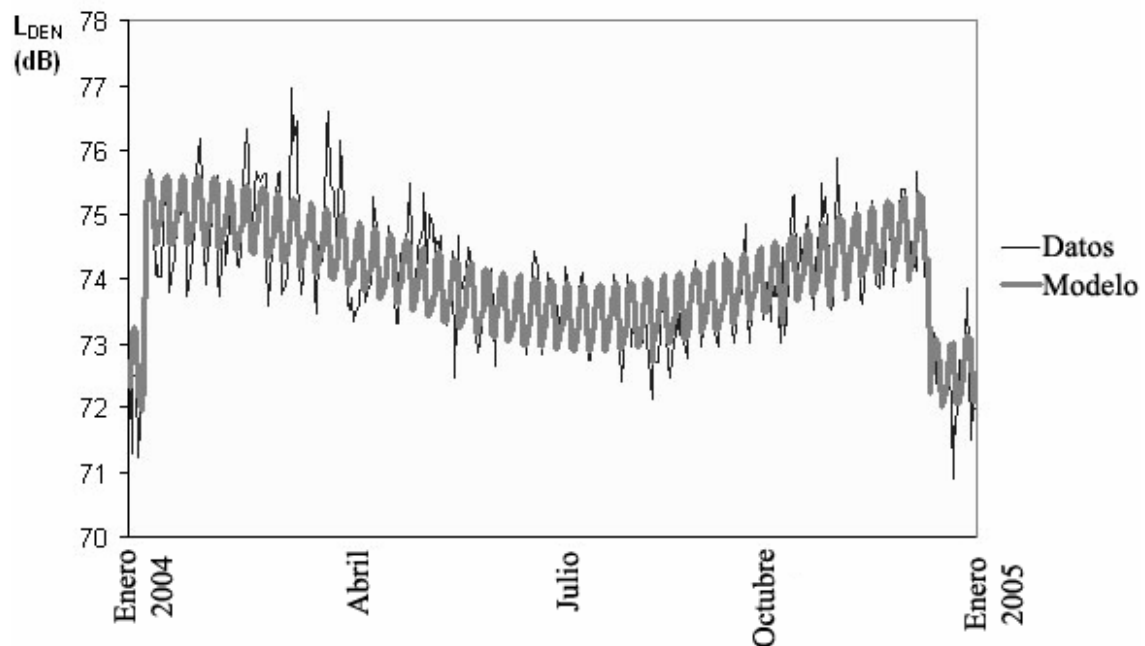


Figura 5.3.3. Modelo determinista sobre datos reales en el año 2004 para el nivel  $L_{DEN}$ .

Se puede observar que el nivel  $L_{DEN}$  muestra la menor volatilidad y velocidad de reversión a la media en comparación con los otros niveles. Asimismo, se observa que el método 2 presenta menores variaciones en la volatilidad y velocidad de reversión entre un día y otro en comparación con el método 1.

| Día              | Volatilidad  |              | Velocidad de reversión |              | Media        |                     |
|------------------|--------------|--------------|------------------------|--------------|--------------|---------------------|
|                  | Método 1     | Método 2     | Método 1               | Método 2     | Volatilidad  | Velocidad Reversión |
| <b>Lunes</b>     | 0,947        | 0,468        | 1,659                  | 0,813        | 0,708        | 1,236               |
| <b>Martes</b>    | 0,728        | 0,469        | 1,502                  | 0,781        | 0,598        | 1,141               |
| <b>Miércoles</b> | 0,842        | 0,476        | 2,170                  | 0,886        | 0,659        | 1,528               |
| <b>Jueves</b>    | 1,015        | 0,489        | 1,655                  | 0,809        | 0,752        | 1,232               |
| <b>Viernes</b>   | 0,859        | 0,532        | 1,530                  | 0,784        | 0,696        | 1,157               |
| <b>Sábado</b>    | 0,830        | 0,540        | 1,463                  | 0,768        | 0,685        | 1,116               |
| <b>Domingo</b>   | 0,987        | 0,569        | 1,442                  | 0,764        | 0,778        | 1,103               |
| <b>Media</b>     | <b>0,887</b> | <b>0,506</b> | <b>1,631</b>           | <b>0,801</b> | <b>0,696</b> | <b>1,216</b>        |

Tabla 5.3.3. Volatilidad (en dB) y velocidad de reversión (en días<sup>-1</sup>) para el nivel  $L_{DEN}$

Teniendo en cuenta todos los niveles sonoros, a través del método 1, la volatilidad oscila entre 0,7 y 1,5 dB (dependiendo del nivel sonoro tomado), y el margen de la diferencia entre la máxima volatilidad y la mínima volatilidad comparando entre días es menor que 0,5 dB. De la misma forma, respecto de la velocidad de reversión, los valores oscilan (excluyendo el miércoles, que presenta un dato de reversión anormalmente alto en comparación con el resto de días) entre 1,3 y 2,9 días<sup>-1</sup>, siendo el margen de la diferencia inferior a 1 día<sup>-1</sup> al comparar entre días.

Por el método 2, la volatilidad varía desde 0,45 hasta 0,8 dB con una variación menor a 0,2 dB al comparar entre días. Con estos resultados, se podría tomar el método 1 y el 2 para estimar los límites superior e inferior, respectivamente, de los niveles sonoros.

| Día              | Volatilidad  |              | Velocidad de reversión |              | Media        |                     |
|------------------|--------------|--------------|------------------------|--------------|--------------|---------------------|
|                  | Método 1     | Método 2     | Método 1               | Método 2     | Volatilidad  | Velocidad Reversión |
| <b>Lunes</b>     | 1,283        | 0,621        | 1,939                  | 0,858        | 0,952        | 1,399               |
| <b>Martes</b>    | 1,248        | 0,612        | 1,457                  | 0,769        | 0,930        | 1,113               |
| <b>Miércoles</b> | 1,389        | 0,624        | 4,372                  | 1,013        | 1,007        | 2,692               |
| <b>Jueves</b>    | 1,509        | 0,563        | 1,885                  | 0,848        | 1,036        | 1,367               |
| <b>Viernes</b>   | 1,250        | 0,624        | 1,602                  | 0,799        | 0,937        | 1,200               |
| <b>Sábado</b>    | 1,019        | 0,715        | 1,621                  | 0,802        | 0,867        | 1,212               |
| <b>Domingo</b>   | 1,224        | 0,819        | 1,321                  | 0,733        | 1,022        | 1,027               |
| <b>Media</b>     | <b>1,275</b> | <b>0,654</b> | <b>2,028</b>           | <b>0,832</b> | <b>0,964</b> | <b>1,430</b>        |

Tabla 5.3.4. Volatilidad (en dB) y velocidad de reversión (en días<sup>-1</sup>) para nivel  $L_{DAY}$ .

| Día              | Volatilidad  |              | Velocidad de reversión |              | Media        |                     |
|------------------|--------------|--------------|------------------------|--------------|--------------|---------------------|
|                  | Método 1     | Método 2     | Método 1               | Método 2     | Volatilidad  | Velocidad Reversión |
| <b>Lunes</b>     | 1,166        | 0,666        | 2,584                  | 0,924        | 0,916        | 1,754               |
| <b>Martes</b>    | 1,073        | 0,613        | 2,690                  | 1,068        | 0,843        | 1,879               |
| <b>Miércoles</b> | 1,154        | 0,707        | 4,143                  | 1,016        | 0,930        | 2,579               |
| <b>Jueves</b>    | 1,157        | 0,651        | 2,830                  | 0,941        | 0,904        | 1,885               |
| <b>Viernes</b>   | 1,415        | 0,700        | 2,506                  | 0,918        | 1,057        | 1,712               |
| <b>Sábado</b>    | 1,407        | 0,745        | 2,855                  | 0,942        | 1,076        | 1,899               |
| <b>Domingo</b>   | 1,247        | 0,744        | 1,839                  | 0,841        | 0,996        | 1,340               |
| <b>Media</b>     | <b>1,232</b> | <b>0,690</b> | <b>2,778</b>           | <b>0,950</b> | <b>0,961</b> | <b>1,864</b>        |

Tabla 5.3.5. Volatilidad (en dB) y velocidad de reversión (en días<sup>-1</sup>) para nivel  $L_{EVENING}$ .

| Día              | Volatilidad  |              | Velocidad de reversión |              | Media        |                     |
|------------------|--------------|--------------|------------------------|--------------|--------------|---------------------|
|                  | Método 1     | Método 2     | Método 1               | Método 2     | Volatilidad  | Velocidad Reversión |
| <b>Lunes</b>     | 1,184        | 0,545        | 1,859                  | 0,851        | 0,864        | 1,355               |
| <b>Martes</b>    | 0,853        | 0,537        | 1,306                  | 0,736        | 0,695        | 1,021               |
| <b>Miércoles</b> | 0,971        | 0,620        | 2,335                  | 0,903        | 0,795        | 1,619               |
| <b>Jueves</b>    | 1,180        | 0,596        | 1,453                  | 0,766        | 0,888        | 1,109               |
| <b>Viernes</b>   | 0,941        | 0,648        | 1,761                  | 0,828        | 0,795        | 1,295               |
| <b>Sábado</b>    | 0,886        | 0,627        | 1,765                  | 0,829        | 0,756        | 1,297               |
| <b>Domingo</b>   | 1,149        | 0,628        | 1,446                  | 0,764        | 0,888        | 1,105               |
| <b>Media</b>     | <b>1,023</b> | <b>0,600</b> | <b>1,704</b>           | <b>0,811</b> | <b>0,812</b> | <b>1,257</b>        |

Tabla 5.3.6. Volatilidad (en dB) y velocidad de reversión (en días<sup>-1</sup>) para nivel  $L_{NIGHT}$ .

Para chequear la validez del modelo, se ha procesado la conducta de los residuos. De esta forma, en la figura 5.3.4 se observa la función de autocorrelación de los residuos obtenida a partir del modelo correspondiente al nivel  $L_{DEN}$ , observándose que todas las autocorrelaciones de la gráfica son insignificantes, lo cual implica que los residuos son estadísticamente independientes. Para los otros niveles la función de autocorrelación de los residuos muestra el mismo resultado (consultar anexos) que el mostrado para el nivel  $L_{DEN}$ .

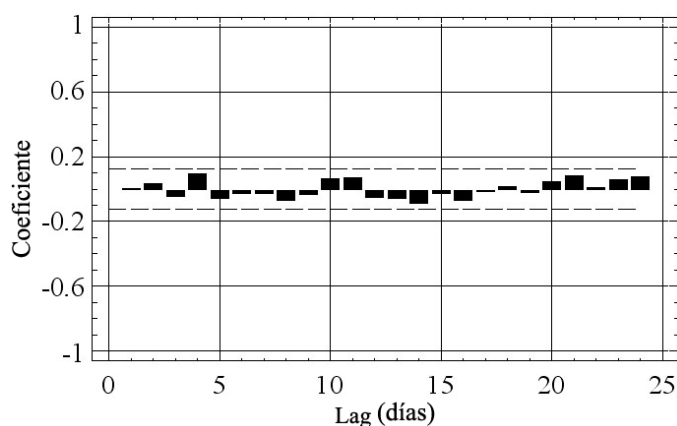


Figura 5.3.4. Función de autocorrelación parcial de los residuos del nivel  $L_{DEN}$ .

No obstante, en la tabla 5.3.7 se muestra los resultados de los tests practicados a los residuos correspondientes al nivel  $L_{EVENING}$ , mostrándose que el modelo es adecuado. El ajuste de distribución de los residuos se asemeja a una distribución elíptica, de esta forma, se ha utilizado una distribución generaliza del error (GED), la cual con un índice de cola de 1 indicaría una distribución de Laplace, y un índice de cola de 2 indicaría una distribución normal. En general, para todos los niveles, el índice de cola de la distribución está alrededor de 1,35.

|           | Tests                |                      |                    |                     |                     |                      |
|-----------|----------------------|----------------------|--------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
|           | AR<br>1-2            | ARCH<br>1 -1         | Normalidad         | Hetero              | Hetero-x            | Reset                |
| Lunes     | 0,0423<br>[0,9586]   | 1,6597<br>[0,1988]   | 59,315<br>[0,0000] | 0,0723<br>[0,9302]  | 0,0723<br>[0,9302]  | 2,961<br>[0,0865]    |
| Martes    | 0,82138<br>[0,4410]  | 0,83036<br>[0,3630]  | 13,330<br>[0,0013] | 0,83323<br>[0,4358] | 0,83323<br>[0,4358] | 0,72473<br>[0,3954]  |
| Miércoles | 0,088847<br>[0,9150] | 16,901<br>[0,0001]   | 8,3255<br>[0,0156] | 3,4178<br>[0,0343]  | 3,4178<br>[0,0343]  | 0,17719<br>[0,6741]  |
| Jueves    | 0,96666<br>[0,3817]  | 0,012489<br>[0,9111] | 7,9405<br>[0,0189] | 0,53652<br>[0,5854] | 0,53652<br>[0,5854] | 0,44086<br>[0,5073]  |
| Viernes   | 1,8709<br>[0,1561]   | 0,20562<br>[0,6506]  | 35,862<br>[0,0000] | 0,41558<br>[0,6604] | 0,41558<br>[0,6604] | 0,19662<br>[0,6578]  |
| Sábado    | 1,1397<br>[0,3215]   | 0,022553<br>[0,8807] | 45,966<br>[0,0000] | 0,41016<br>[0,6640] | 0,41016<br>[0,6640] | 0,042171<br>[0,8375] |
| Domingo   | 1,0298<br>[0,4011]   | 0,095590<br>[0,7574] | 39,788<br>[0,0000] | 0,89178<br>[0,4112] | 0,89178<br>[0,4112] | 0,22564<br>[0,6352]  |

Tabla 5.3.7. Resultados test de los residuos del nivel  $L_{EVENING}$  (corchetes p-valor).

Finalmente, la figura 5.3.5 muestra la trayectoria media y los percentiles 1% - 99% (límites superior e inferior) correspondientes a 5000 simulaciones del modelo correspondiente al nivel  $L_{DEN}$  (GED con índice de cola de 1,35; cada simulación para el período completo) para el período desde el 1 de enero del 2006 hasta el 12 de febrero del 2006, mostrándose pequeñas diferencias entre los datos reales y los estimados a partir del modelo.

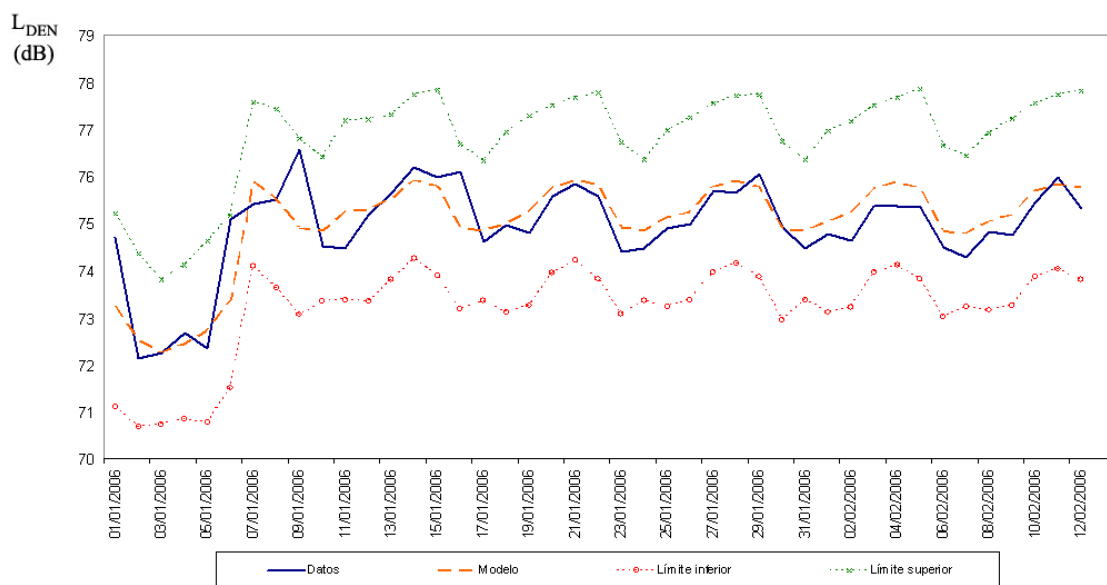


Figura 5.3.5. Valor medio e intervalos de confianza de la simulación del modelo correspondientes al nivel  $L_{DEN}$ .

#### 5.3.4 COMPARACIÓN Y RESULTADOS DEL MODELO EN TODAS LAS LOCALIZACIONES

Una vez realizado el ajuste para la localización A se procede a realizar el ajuste para las otras localizaciones siguiendo el mismo procedimiento de cálculo que el descrito en apartados anteriores. Los primeros resultados muestran que el ajuste del modelo para la localización E es inadecuado: el modelo determinista obtenido tiene un coeficiente de correlación del 8%, teniendo además en cuenta que el ciclo correspondiente a la función seno tampoco es aplicable a esta localización (este hecho podría ser debido a la ausencia del tráfico que si que está presente en las otras localizaciones). Incluso, eliminando la componente cíclica de la función seno, el modelo determinista sigue siendo inadecuado (mejoras del coeficiente de correlación solo hasta un 12%). Es por ello que el cálculo de las volatilidades y reversión a la media, para esta localización, no ha sido considerado.

Para el resto de localizaciones y para cada uno de los niveles sonoros el modelo determinista viene mostrado en las tablas 5.3.8, 5.3.9 y 5.3.10. En estas tablas, las variables dummy tenidas en cuenta (siguiendo la notación de la localización A) son:  $\beta_1$ : Días Festivos;  $\beta_2$ : Navidad;  $\beta_3$ : Verano;  $\beta_4$ : Obras en la vía pública. Se observa que sólo la dummy de días festivos es común a todas las localizaciones, mientras que no todas las localizaciones están afectadas de la misma forma por el verano o por navidad. La dummy debida a las obras en la localización C se añadió debido al extenso período de tiempo debido a obras en dicha localización, de manera que se pudiera cuantificar su efecto.

| Nivel         | Modelo determinista (dB)   | Dummy (dB) |           |           | $R^2$  |
|---------------|--|------------|-----------|-----------|--------|
|               |  | $\beta_1$  | $\beta_3$ | $\beta_4$ |        |
| $L_{DEN}$     | $75,78 - 0,00060 \cdot t + 0,3636 \cdot \text{sen}(\omega t + 0,84)$ | -0,25      | -0,98     | -1,73     | 0,7766 |
| $L_{DAY}$     | $73,43 - 0,00063 \cdot t + 0,4607 \cdot \text{sen}(\omega t + 1,01)$ | -3,47      | -1,19     | -1,45     | 0,8894 |
| $L_{EVENING}$ | $72,21 - 0,00054 \cdot t + 0,5200 \cdot \text{sen}(\omega t + 0,85)$ | -1,68      | -1,05     | -1,56     | 0,7472 |
| $L_{NIGHT}$   | $67,25 - 0,00066 \cdot t + 0,2762 \cdot \text{sen}(\omega t + 0,54)$ | +1,36      | -0,88     | -1,82     | 0,8403 |

Tabla 5.3.8. Modelo determinista para los niveles sonoros en la localización B.

| Nivel         | Modelo determinista (dB)   | Dummy (dB) |           | $R^2$  |
|---------------|--|------------|-----------|--------|
|               |  | $\beta_1$  | $\beta_3$ |        |
| $L_{DEN}$     | $69,24 - 0,00037 \cdot t + 0,8285 \cdot \text{sen}(\omega t + 1,31)$ | -0,97      | -1,64     | 0,7859 |
| $L_{DAY}$     | $68,00 - 0,00045 \cdot t + 0,981 \cdot \text{sen}(\omega t + 1,02)$  | -4,24      | -1,56     | 0,9097 |
| $L_{EVENING}$ | $66,14 - 0,00018 \cdot t + 0,826 \cdot \text{sen}(\omega t + 1,39)$  | -2,06      | -1,63     | 0,6239 |
| $L_{NIGHT}$   | $59,20 - 0,00040 \cdot t + 0,6034 \cdot \text{sen}(\omega t + 1,57)$ | 1,19       | -1,60     | 0,7243 |

Tabla 5.3.9. Modelo determinista para los niveles sonoros en la localización C.

| Nivel         | Modelo determinista (dB)   | Dummy (dB) |           | $R^2$  |
|---------------|--|------------|-----------|--------|
|               |  | $\beta_1$  | $\beta_2$ |        |
| $L_{DEN}$     | $66,85 - 0,00034 \cdot t + 0,7235 \cdot \text{sen}(\omega t + 1,15)$ | -0,38      | +0,91     | 0,7358 |
| $L_{DAY}$     | $64,19 - 0,00025 \cdot t + 1,0164 \cdot \text{sen}(\omega t + 1,15)$ | -2,81      | +0,46     | 0,7811 |
| $L_{EVENING}$ | $63,16 - 0,00005 \cdot t + 0,8302 \cdot \text{sen}(\omega t + 1,18)$ | -0,92      | +0,76     | 0,6307 |
| $L_{NIGHT}$   | $58,56 - 0,00051 \cdot t + 0,5313 \cdot \text{sen}(\omega t + 1,12)$ | +0,81      | +0,79     | 0,7471 |

Tabla 5.3.10. Modelo determinista para los niveles sonoros en la localización D.

Para los datos de las desviaciones en el parámetro A, del modelo determinista, y para cada una de las localizaciones se debe consultar los anexos, pero se mencionará que los resultados al comparar unos días y otros muestras las mismas consideraciones que las obtenidas para la localización A (si bien en distinto grado de magnitud).

A la vista de los resultados del modelo determinista para cada una de las localizaciones se observa, que el parámetro A, en general, es distinto para cada una de las localizaciones y las diferencias entre cada uno de los niveles sonoros también son diferentes para cada una de las localizaciones. Para el parámetro B, que controla la

tendencia lineal de los niveles sonoros, se observa que en todas las localizaciones existe una tendencia decreciente (el parámetro B es negativo), si bien existen diferencias entre unas localizaciones y otras, al comparar los valores obtenidos en la misma localización para cada nivel sonoro, no se presentan diferencias significativas, si bien, la excepción, en este apartado, es la localización D. Para el parámetro C, los valores típicos encontrados, con ligeras variaciones, rondan los 0,8 dB de media, si bien, en la localización B toma valores inferiores en torno a los 0,4 dB y 0,5 dB. Mientras, el desfase temporal de la función seno toma valores de forma que el máximo y el mínimo valor de la función tienen lugar entre los meses de enero-febrero y julio-agosto respectivamente.

Con respecto a las variables dummy, se observa para la dummy de los fines de semana,  $\beta_1$ , los mismos efectos que los obtenidos en la localización A. Esto es, provoca una disminución en los niveles  $L_{DEN}$ ,  $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$ , siendo la mayor disminución la correspondiente al nivel  $L_{DAY}$ , mientras que para el nivel  $L_{NIGHT}$  se produce un aumento en los niveles sonoros. Por el contrario, para las otras variables dummy incluidas, el efecto es más o menos el mismo para cada nivel sonoro, debiéndose añadir que para las localizaciones B y C la dummy de verano provoca una disminución de los niveles (con distinto grado), y que mientras para la localización A la dummy de Navidad provoca una disminución en los niveles (en torno a 2,5 dB), en la localización D provoca el efecto contrario produciéndose un aumento de los niveles (en torno a 0,8 dB).

Por último, remarcar que, a pesar de existir diferencias entre unas localizaciones y otras en el modelo determinista, los valores de los coeficientes de correlación del modelo determinista son altos, en torno al 70% para el nivel  $L_{EVENING}$  que es el que presenta



peor ajuste y el 80%-85% para el nivel  $L_{DAY}$  que es el que mejor ajuste presenta del modelo determinista.

Con respecto a los resultados de volatilidades y reversiones a la media las tablas 5.3.11 y 5.3.12 muestran los valores medios semanales, para cada nivel, método y localización (consultar los anexos para los valores de volatilidades y reversiones a la media de cada día por separado), debiendo indicar que las desviaciones en las volatilidades y reversiones a la media para cada día en particular respecto del valor medio presentado en las tablas se sitúa en torno a un margen  $\pm 20\%$  para el método 1 y en torno al 10% para el método 2 en los resultados para las volatilidades, mientras que para la reversión a la media esta desviación es, por lo general superior a la encontrada en las volatilidades, estando, por lo general (y con excepciones para el nivel  $L_{DAY}$ ) en torno al  $\pm 30\text{-}40\%$  para el método 1 y de un  $\pm 10\text{-}15\%$  para el método 2.

| Volatilidades medias |           |           |               |             |           |           |               |             |
|----------------------|-----------|-----------|---------------|-------------|-----------|-----------|---------------|-------------|
| Localización         | Método 1  |           |               |             | Método 2  |           |               |             |
|                      | $L_{DEN}$ | $L_{DAY}$ | $L_{EVENING}$ | $L_{NIGHT}$ | $L_{DEN}$ | $L_{DAY}$ | $L_{EVENING}$ | $L_{NIGHT}$ |
| A                    | 0,887     | 1,275     | 1,232         | 1,023       | 0,506     | 0,654     | 0,690         | 0,600       |
| B                    | 0,989     | 1,491     | 1,107         | 1,163       | 0,631     | 0,646     | 0,695         | 0,737       |
| C                    | 1,739     | 2,555     | 1,472         | 1,425       | 0,819     | 0,919     | 0,924         | 0,918       |
| D                    | 1,246     | 1,251     | 1,396         | 1,484       | 0,635     | 0,722     | 0,840         | 0,798       |

Tabla 5.3.11. Volatilidades medias (en dB) para cada localización.

Se observa, en general, para las volatilidades medias, que las menores volatilidades, tanto para el método 1 como para el método 2, se obtienen para el nivel  $L_{DEN}$ , mientras que no se puede establecer, de forma general, cuál es el nivel que presenta la mayor volatilidad, ya que depende de la localización. Si bien, se debe mencionar que por el método 2, la mayor volatilidad se corresponde al nivel  $L_{EVENING}$ , mientras que por el

método 1 es el nivel  $L_{DAY}$  (con la excepción de la localización D). No obstante esta observación es respecto a las volatilidades medias ya que si se observan las volatilidades para cada día (consultar anexos), las diferencias entre los niveles son dispares dependiendo del día y del nivel comparado.

Por último, remarcar las diferencias en la volatilidad que presenta la localización C respecto del resto de localizaciones, sobretodo con las volatilidades obtenidas por el método 1. La causa de estas diferencias es debida al período de obras en dicha localización ya que modifica la regularidad en el patrón de los niveles sonoros, y con ello unas volatilidades superiores.

| Velocidad de Reversión a la media |           |           |               |             |           |           |               |             |
|-----------------------------------|-----------|-----------|---------------|-------------|-----------|-----------|---------------|-------------|
| Localización                      | Método 1  |           |               |             | Método 2  |           |               |             |
|                                   | $L_{DEN}$ | $L_{DAY}$ | $L_{EVENING}$ | $L_{NIGHT}$ | $L_{DEN}$ | $L_{DAY}$ | $L_{EVENING}$ | $L_{NIGHT}$ |
| A                                 | 1,631     | 2,028     | 2,778         | 1,704       | 0,801     | 0,832     | 0,950         | 0,811       |
| B                                 | 1,419     | 1,227     | 1,451         | 1,563       | 0,752     | 0,704     | 0,754         | 0,787       |
| C                                 | 2,142     | 3,097     | 2,608         | 2,232       | 0,872     | 0,888     | 0,918         | 0,845       |
| D                                 | 1,558     | 1,240     | 1,624         | 2,035       | 0,787     | 0,706     | 0,796         | 0,850       |

Tabla 5.3.12. Valor medio de la velocidad de reversión (en  $\text{días}^{-1}$ ) en cada localización.

De la misma forma, para los valores de la velocidad de reversión a la media las diferencias encontradas entre los niveles y las localizaciones son similares a las encontradas con las volatilidades, incluyendo los mayores valores para la localización C debido al efecto de las obras. Si bien tanto para las volatilidades, como para las velocidades de reversión, remarcar las menores diferencias en los parámetros a través del método 2 de cálculo. Por último, indicar que a efectos de comprobar la validez del modelo, los cálculos del error para cada nivel y localización figuran en los anexos. De

la misma forma en los mismos anexos figuran cada una de las simulaciones sobre los primeros meses del año 2006 de cada nivel sonoro y localización.

## 6. LINEAS INVESTIGACIÓN

Las líneas de investigación futuras a raíz de la realización de la Tesis Doctoral continúan en la línea del estudio de los niveles sonoros ambientales, tanto en su determinación y predicción como en la caracterización del error cometido cuando tomamos distintos periodos de muestreo, de esta forma, el primer desarrollo que se sugiere tras la presente Tesis Doctoral es la posibilidad de poder comparar los resultados obtenidos con otras ciudades, bien a nivel nacional, bien a nivel internacional. El entorno más inmediato es el nivel nacional, si bien no se deja cerrada la posibilidad de contrastar algunos resultados con datos de otras ciudades externas al territorio nacional. El principal inconveniente de este desarrollo es la cooperación por parte de las autoridades en la obtención y adquisición de los datos pues implica la obtención de grandes bases de datos en distintas ubicaciones para períodos de tiempo de larga duración.

Entre otros proyectos de investigación en desarrollo o en vías de desarrollo se puede también destacar los siguientes:

1. *Cuantificación del error cometido en la conversión de los niveles  $L_{DIA}$  y  $L_{NOCHE}$  determinados por la legislación autonómica a los parámetros  $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$  y  $L_{NIGHT}$ .*

Para dicho estudio se parte de la problemática de la elaboración de los mapas de ruido de distintas ciudades en base a los índices  $L_{DIA}$  y  $L_{NOCHE}$  que se corresponden (o incluyen) con otras franjas horarias (tanto en duración como en horario) distintas a la de los parámetros  $L_{DAY}$ ,  $L_E$  y  $L_N$ , que legislan la actual normativa. De esta forma se pretende obtener la mejor correlación posible entre dichos parámetros minimizando el error cometido, teniendo en cuenta factores tales como el valor de cada uno de los niveles y la caracterización de la zona.

2. *Algoritmos de optimización para la determinación del tiempo de estabilización de una hora en tiempo real.*

Para este proyecto se intentará diseñar una serie de algoritmos, en tiempo real, de forma que permitan en función de factores estadísticos tales como la media, la desviación típica muestral de medidas de menor duración (un minuto). Obtener el nivel equivalente de una hora, con la mayor precisión posible, exigiendo un margen de probabilidad.

*3. Modelos matemáticos para los niveles mínimos de una hora,  $L_{eq,1h}$ , en cada franja horaria.*

De parte del desarrollo de la presente Tesis se ha observado que el valor mínimo del nivel equivalente de 1 hora, para una franja horaria determinada, presenta menor presencia de valores anómalos que el correspondiente nivel sonoro de dicha franja, por lo que sería más útil basarse en los valores mínimos para su determinación que en los correspondientes al valor del nivel sonoro de toda la franja horaria. Asimismo el estudio se puede extender al análisis de los niveles máximos de una hora.

*4. Estudio de probabilidad de eventos anómalos en los niveles  $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$  y  $L_{NIGHT}$ .*

El desarrollo de este estudio pretende obtener si la presencia de un evento considerado como anómalo presenta cierta regularidad en función de la caracterización de la zona y en función de la franja horaria considerada. De la misma forma se pretende obtener cuál es la probabilidad de tener un evento considerado como anómalo dentro de cada franja horaria, de forma que puede incluirse este tipo de eventos como una variable aleatoria más dentro de un modelo matemático.

*5. Implementación de técnicas de control para la detección de anómalos.*

A partir del conocimiento de las distribuciones estadísticas normalizadas para cada hora, implementar técnicas de análisis de control para analizar cuando se producen modificaciones en los parámetros, y con ello prever la variación de los niveles sonoros frente a un aumento o disminución de los mismos o la detección de medidas anómalas fuera del comportamiento esperado. Asimismo mediante estas técnicas podría cuantificarse de mejor forma las mejoras (o no) en los niveles sonoros cuando se realiza alguna actuación en el entorno de la medición.

## 7. CONCLUSIONES

En la presente Tesis Doctoral diferentes tipos de análisis han sido realizados a los distintos niveles sonoros  $L_{DEN}$ ,  $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$  y  $L_{NIGHT}$ . Asimismo dichos análisis han sido practicados en distintos entornos urbanos con distintas características sonoras (si bien la fuente sonora principal es debida al tráfico) a los que hay que añadir los análisis correspondientes a un entorno suburbano. De estos estudios y las comparaciones realizadas entre cada uno de los niveles sonoros y a modo de resumen, podemos destacar las siguientes conclusiones:

1 – Desde el punto de vista de la estimación del nivel anual  $L_{DEN}$  a partir de medidas de menor duración se obtienen las siguientes consideraciones:

1.a) Si la estimación se realiza a partir de niveles sonoros mensuales, se debe de tener en cuenta el período del año donde se realiza la medición, ya que, en general, el análisis temporal nos muestra períodos cíclicos que se repiten cada 12 meses. En estos ciclos, la diferencia entre el mes con mayor nivel sonoro y el mes con menor nivel sonoro oscila en torno a los 3 dB, por lo que la estimación nos proporcionará desviaciones, respecto de la media anual de, en el peor de los casos,  $\pm 1.5$  dB. Estableciendo la misma conclusión en base a las medidas de los niveles sonoros  $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$  o  $L_{NIGHT}$ .

1.b) Si la estimación se realizara a partir de niveles sonoros diarios, a la anterior diferencia existente entre el valor medio del nivel sonoro anual y el nivel sonoro mensual (para un mes específico) habría que adicionarle el efecto de la dispersión que presentan los niveles sonoros diarios. En este caso, se ha encontrado que los valores de

la desviación típica de los niveles sonoros diarios (para cada mes) se mantiene como un valor constante contemplando todos los meses y todos los años, por lo que el error en la estimación al tomar un día de un mes concreto respecto de otro mes cualquiera sería la misma, si bien deberá ser corregido el error cometido en el valor medio correspondiente al mes de medición. Para estos casos, y como aportación de la presente Tesis los valores encontrados para la desviación típica mensual, en general, son inferiores a 1 dB para el nivel  $L_{DEN}$ , 2 dB para el nivel  $L_{DAY}$ , 1,5 dB para el nivel  $L_{EVENING}$  y 2 dB para el nivel  $L_{NIGHT}$ , determinando que si la desviación típica mensual supera los valores de referencia anteriores no debería tomarse como buen estimador, puesto que se ha encontrado que para aquellos datos que presentan desviaciones típicas mensuales elevadas se suelen corresponder con valores anómalos dentro del análisis temporal de larga duración (con alguna excepción).

1.c) Con respecto a la contribución de los fines de semana y festivos en las estimaciones del nivel  $L_{DEN}$  anual si se excluyen del mismo los fines de semana y festivos, se observa que el valor medio mensual del nivel  $L_{DEN}$  apenas sufre variaciones significativas, por lo que se podría tomar solo los días laborables para realizar la estimación de los niveles  $L_{DEN}$  de larga duración. Por el contrario para el nivel  $L_{DAY}$  los valores medios mensuales correspondientes a días laborables son en general 1 dB superiores que si se considera la media mensual tomando todos los días, manteniéndose esta diferencia para cualquier período del año. Lo mismo ocurre para el nivel mensual  $L_{EVENING}$  correspondiente a días laborables, si bien esta diferencia podría considerarse insignificativa, en torno a 0,3 dB, a diferencia del nivel  $L_{DAY}$ . Por último para el nivel  $L_{NIGHT}$  ocurre al contrario, los valores de los niveles medios mensuales correspondientes a los días laborables son inferiores respecto de tomar todos los días, si

bien esta diferencia no llega a ser constante a lo largo del año como ocurría con el nivel  $L_{DAY}$  (de forma que para algunos meses es mayor y en otros meses es menor). No obstante la aportación más importante en este punto es relativa a la dispersión que presentan los niveles sonoros diarios, ya que si bien la desviación típica mensual de los niveles  $L_{DEN}$  correspondiente a los días laborables no presenta diferencias significativas con respecto a la desviación típica mensual contemplando todos los días, si que se ha observado que para los niveles  $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$  y  $L_{NIGHT}$  las desviaciones típicas mensuales de los días laborables son menores que considerando todos los días, por lo que las estimaciones realizadas en base a niveles sonoros diarios presentaran menores desviaciones (diferencias). O lo que es lo mismo las desviaciones en los niveles sonoros de un día laborable respecto de otro día laborable son menores de las existentes respecto a los fines de semana. De esta forma si se realiza la estimación de los niveles sonoros anuales en base a niveles sonoros diarios es preferible que esta estimación se realice teniendo en cuenta los días laborables y tomando como referencia las desviaciones en el valor medio consideradas anteriormente.

1.d) Si se considera el punto de vista de la metodología empleada y del período de evaluación se puede indicar que para estimaciones basadas en el muestreo, los mayores errores cometidos en dichas predicciones son aquellas que se basan en las mediciones de días en continuo en contraposición con los niveles sonoros obtenidos a partir de mediciones en días aleatorios, con independencia del nivel sonoro evaluado. Si bien, los peores resultados en la estimación de los niveles sonoros anuales (de larga duración), para un número de días determinado como estimador se corresponden con el nivel  $L_{DAY}$ , mientras que las mejores estimaciones se corresponden al nivel sonoro  $L_{DEN}$  seguido (en resultados) por el nivel  $L_{EVENING}$ . De la misma forma y siguiendo los



resultados obtenidos para días laborables, se demuestra que la estimación del nivel sonoro anual correspondiente a días laborables es más realista que la estimación del nivel sonoro anual considerando todos los días, ya que presenta menores errores. Como aportación y a modo de referencia las tablas 5.1.1 y 5.1.2 para cada una de las localizaciones pueden utilizarse como referencia para la evaluación de los errores cometidos en la estimación de los niveles sonoros de larga duración (anuales).

2 – Para las estimaciones de niveles sonoros de media duración correspondientes a períodos de 7, 14 o 28 días se debe destacar las siguientes aportaciones:

En referencia a considerar estimaciones en días laborables o todos los días se repiten las mismas consideraciones respecto a en las estimaciones de los niveles anuales (ya que las diferencias debidas a la dispersión en los datos son competencia de los niveles diarios). Es por esto que se puede indicar como aportación y basándonos en las estimaciones tomadas en días laborables (para obtener un margen de confianza del error dentro de la banda de  $\pm 1$  dB) que para la determinación del nivel sonoro  $L_{DEN}$  es suficiente con tomar 2 días en continuo para las predicciones del nivel sonoro de 7 días, 5 días de medición en continuo para las predicciones del nivel sonoro de 14 días y 10 días de medición en continuo para las predicciones del nivel sonoro de 28 días para el mejor de los casos. No obstante para el peor de los casos, y para la misma banda de probabilidad del error se deberían tomar 4, 8 ó 15 días para las estimaciones de los niveles sonoros  $L_{DEN}$  de 7 días, 14 días ó 28 días respectivamente. Para el resto de niveles las referencias en cuanto al número de días de medición en continuo vienen dadas por la tabla 5.1.12.

3 – Con respecto a la estimación de los niveles sonoros diarios (corta duración) a partir de la medición de una o más horas bien en continuo o bien de forma aleatoria:

En estos casos, no se aprecian diferencias significativas entre las estimaciones de niveles sonoros de un día laborable respecto a considerar un día cualquiera, sin embargo, se ha encontrado que los resultados son más dispares entre las localizaciones. Se demuestra que sigue siendo mejor muestrear de forma aleatoria que no de forma continua, ahora bien se debe remarcar que para la estimación de los niveles diarios es más práctica la medición de forma continua de varias horas que no de forma aleatoria. En general, tomando como referencia una única hora de medición dentro de cada franja horaria el error al estimar el nivel sonoro diario está dentro de un margen de  $\pm 2$  dB para los niveles  $L_{DAY}$  y  $L_{EVENING}$ , mientras que para obtener un error en la banda de  $\pm 1$  dB se deben tomar 4 horas en continuo para el nivel  $L_{DAY}$  y 2 horas en continuo para la estimación del nivel  $L_{EVENING}$ . No obstante estas estimaciones pueden mejorarse cuando se seleccionan conveniente determinadas horas dentro de cada período, ya que existen horas que presentan mayor diferencia con respecto al nivel sonoro diario y también existen horas donde los niveles sonoros de una hora presentan mayor dispersión, por lo que evitando esas horas se obtendrá mejores predicciones. Por el contrario, para el nivel  $L_{NIGHT}$  los resultados difieren más entre localizaciones, siendo el error mucho mayor que el encontrado para los niveles  $L_{DAY}$  y  $L_{EVENING}$ . Contemplando todas las localizaciones el mayor error cometido tomando una hora como referencia en la determinación del nivel sonoro diario  $L_{NIGHT}$  es de  $\pm 4$  dB, debiendo tomar 6 horas de medición en continuo para obtener un error dentro de la banda de  $\pm 2$  dB. De la misma forma si para la determinación del nivel sonoro diario  $L_{DEN}$  se emplea una hora de medición en cada uno de los períodos DAY, EVENING y NIGHT, el error cometido en

dicha estimación se sitúa en una banda de  $\pm 2$  dB contemplando todas las localizaciones.

Teniendo en cuenta las estimaciones en base a niveles sonoros de una hora, y extrapolando las estimaciones a períodos de media duración (7, 14 ó 28 días), los resultados muestran que el error cometido se encuentra en un margen de  $\pm 2$  dB al emplear estimaciones en días laborables, siendo los resultados peores y menos homogéneos entre las localizaciones cuando se toman todos los días, no existiendo apenas diferencias con los encontrados cuando se tomaban como estimadores los niveles sonoros diarios. Sin embargo, este resultado no ha podido extenderse a la estimación del nivel sonoro  $L_{NIGHT}$ , siendo los márgenes de error más grandes (para las estimaciones en base a una hora) que respecto a los encontrados cuando se tomaba como estimador el nivel sonoro diario  $L_{NIGHT}$ .

#### 4 – Con respecto al tratamiento estadístico de los niveles sonoros:

Las aportaciones y valores de referencia obtenidos en las estimaciones de los niveles sonoros se han explicado analizando estadísticamente las imprecisiones obtenidas por muestreo. Un análisis estadístico más profundo, que permita explicar razonadamente, y con mayor aplicación viene determinado por el análisis de las distribuciones estadísticas de los niveles sonoros de cada una de las 24 horas del día, ya que el posible ajuste estadístico a algún tipo de distribución empírica nos permitiría obtener la probabilidad del error en la estimación de los niveles sonoros  $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$  o  $L_{NIGHT}$  a partir de una hora de medición. Para ello y para contrastar mejor los datos se procede a normalizar los niveles de cada hora con referencia al nivel sonoro diario del período donde es extraída

la hora, de forma que se evite la componente estacional presente en los datos. Se puede concluir que los niveles sonoros siguen algún tipo de distribución estadística, existiendo horas que son más susceptibles que otras de ser ajustadas. Destacando como aportación que (para los distintos tipos de distribuciones empíricas evaluadas) las distribuciones Johnson SU y la distribución Log-Logistic 3P permiten ajustar un mayor número de horas; correspondiendo a los períodos DAY y EVENING los que ajustan un mayor número con respecto al período NIGHT que ajusta un menor número de horas. Por el contrario, para las localizaciones no afectadas por el ruido de tráfico, el período NIGHT es el que presenta un mayor número de ajustes. En general, para una hora en particular, los parámetros de ajuste de la distribución son similares a los encontrados en otros años (con alguna pequeña excepción), si bien cabe destacar que los parámetros para la misma hora no se corresponden al comparar entre todas las localizaciones. De la misma forma, para una localización en concreto, las distribuciones estadísticas, si bien para algunas horas pueden ser similares, presentando ligeras variaciones, son distintas. No obstante, del hecho de poder conocer que los datos acumulados de los niveles sonoros (normalizados) siguen una distribución estadística permiten utilizar el análisis estadístico de forma que se puedan establecer límites de confianza del error cometido al utilizar el nivel sonoro de una hora de medición, así como técnicas de detección de valores anómalos en una medición. Se concluye, que el peor intervalo de ajuste es el correspondiente a la franja que va desde las 3:00 h del período NIGHT hasta las 11:00 horas del período DAY, lo que en cierta medida nos lleva a determinar la franja de horas a evitar a la hora de estimar los niveles sonoros. Si se debiera destacar alguna hora dentro de la franja que presenta mejores ajustes se debería seleccionar la franja desde las 11:00 h hasta las 16:00 h en el período DAY; las franjas 19:00h – 20:00 h y las 22:00h -

23:00 horas en el período EVENING y, por último la franja 1:00h – 2:00 h en el período NIGHT.

#### 5 – Obtención de un modelo matemático:

Como última y una de las aportaciones más importantes de la presente Tesis Doctoral se ha obtenido un modelo matemático (modelo Gaussian Ornstein – Uhlenbeck) que permite explicar la evolución de los niveles sonoros diarios, aplicable a cada uno de los niveles sonoros  $L_{DEN}$ ,  $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$  o  $L_{NIGHT}$  y a las localizaciones en entorno urbano afectadas por el ruido de tráfico, ya que el modelo no es fiable en la localización suburbano. Este modelo contempla una parte determinista, explicada mediante una constante,  $A$ , y una tendencia lineal (en la práctica despreciable) en adición de una función senoidal que describe las diferencias estacionales a lo largo del año, y por otra parte una componente aleatoria que presenta propiedades de volatilidad y reversión a la media siendo dependientes del día de la semana en consideración. Se destaca que la principal diferencia en el modelo determinista al aplicarse a cada uno de los niveles sonoros ( $L_{DEN}$ ,  $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$  o  $L_{NIGHT}$ ) es en la constante  $A$ , que mide el valor medio del nivel sonoro, que es dependiente del día de la semana, si bien las diferencias encontradas entre los días laborables son pequeñas, siendo mayores con respecto a los del fin de semana. Con respecto a la componente aleatoria, los valores de la volatilidad diaria toman valores medios que oscilan en un rango entre 0.7 y 1 dB (dependiendo del nivel sonoro evaluado), con pequeñas diferencias entre distintos días. Por otra parte, la reversión a la media toma valores que están en torno a 1 días<sup>-1</sup> y 2 días<sup>-1</sup>. Las simulaciones realizadas a partir del modelo para cada una de las localizaciones y niveles

sonoros muestran que los datos reales son próximos a los simulados cayendo los datos reales dentro de los márgenes de confianza del 1% y 99% de probabilidad.

Por último y para destacar el trabajo realizado en la presente Tesis Doctoral se ha obtenido la publicación de parte de la investigación realizada en dos revistas del ámbito científico. Por una parte el artículo “*Sampling techniques for the estimation of the annual noise level under urban traffic conditions*”. *Applied Acoustics* 64(2003) 1, 43-53 fruto del desarrollo del diploma de estudios avanzados (DEA). Artículo que ha sido uno de los mas citados desde el año 2002 hasta el año 2005 (Criterio de selección: Uno de los 10 artículos más citados por cada año. [www.scopus.com](http://www.scopus.com)). Por otra parte el artículo “*A stochastic model for the noise levels*” aprobado por el Journal of Acoustical Society American (J. Acoust. Soc. Am. Volume 125, Issue 5, pp. 3030-3037. May 2009. Permalink: <http://dx.doi.org/10.1121/1.3109980>). Así como pendientes de la aceptación del artículo “*Analysis of  $L_{DEN}$  in measurements of long duration and its relationship to  $L_{DAY}$ ,  $L_{EVENING}$  and  $L_{NIGHT}$  in urban traffic conditions*”, por parte de la revista Applied Acoustics.



## 8. BIBLIOGRAFIA

- [1]. Directiva 2002/49/EC, Journal of the European Communities 18.07.2002.
- [2]. A. L. Brown, K.C. Lam, "Urban noise surveys". Applied Acoustics 20, 23-39 (1987)
- [3]. M. Omiya, K. Kuno, Y. Mishina, Y. Oishi, A. Hayashi, "Comparison of community noise ratings by L50 and LAeq", Journal Of Sound and Vibration 205, 545-554 (1997).
- [4]. J. M. Barrigón, V. Gómez, J. Méndez, R. Vílchez, J. Trujillo " An environmental noise study in the city of Caceres, Spain". Applied Acoustics 63, 1061 – 1070 (2002).
- [5]. J. M. Barrigón, V. Gómez, J. Méndez, R. Vílchez, J. Vaquero, J. Trujillo. "A categorization method applied to the study of urban road traffic noise". Journal of Acoustical Society of America 117, 2844-2852 (2005).
- [6]. D. Chakrabarty, S. Santra, A. Mukherjee, B. Roy, and P. Das. "Status of road traffic noise in Calcutta metropolis". Journal of Acoustical Society of America 101, 943-949 (1997)
- [7]. P. Trombetta, F. Belisario, W. Alves. "Environmental noise pollution in the city of Curitiba, Brazil". Applied Acoustics 63, 351-358 (2002).
- [8]. W. M. to, R. Ip, G. Lam, C. Yau. "A multiple regression model for urban traffic noise in Hong Kong". Journal of Acoustical Society of America 112, 551-556 (2002).
- [9]. B. Li, S. Tao, R.W. Dawson. "Evaluation and analysis of traffic noise from the main urban roads in Beijing". Applied Acoustics 63, 1137-1142 (2002).
- [10]. C. J. Skinner, C. J. Grimwood. "The UK noise climate 1990-2001: population exposure and attitudes to environmental noise". Applied Acoustics 66, 231-243 (2005).
- [11]. A. Garcia, J. Garrigues. "24-Hour continuous sound level measurements conducted in Spanish urban areas". Noise Control Engineering 46, 159-166 (1998).



- [12]. T. Kihlman, S. Abukhader. "Long term noise abatement planning-case studies in Göteborg, Sweden". Proceedings Internoise 2001, The Hague, 2001.
- [13]. M. U. Onuu. "Road traffic noise in Nigeria: measurements, analysis and evaluation of nuisance". Journal of Sound and Vibration 233, 391-405 (2000).
- [14] J. Alberola, I. H. Flindell, A.J. Bullmore. "Variability in road traffic noise levels". Applied Acoustics 66, 1180-1195 (2005).
- [15] J. Romeu, S. Jiménez, M. Genescà, T. Pàmies, R. Capdevila. "Spatial sampling for night levels estimation in urban environments". Journal of Acoustical Society of America 120, 791-800 (2006)
- [16] E. Gaja, A. Giménez, S. Sancho, A. Reig. "Sampling techniques for the estimation of the annual equivalent noise level under urban traffic conditions". Applied Acoustics 64, 43-53.
- [17] J. Romeu, S. Jimenez, T. Pamies, M. Genesca. "Lden assesment methodology for acoustic maps: simulation or measurements?". Proceedings of internoise 2003, Jeju, Korea, 2003.
- [18] E. A. Björk. "Community noise in different seasons in Kuopio, Finland". Applied Acoustics 42, 137 – 150. (1994).
- [19] P. D. Schomer, R. E. Devor. "Temporal sampling requirements for estimation of long-term average sound levels in the vicinity of airports". Journal of Acoustical Society of America 69, 713 – 719 (1981).
- [20] R. E. Devor, P. D. Schomer. "Development of temporal sampling strategies for monitoring noise". Journal of Acoustical Society of America 66, 763 – 771 (1979).
- [21] C. Larsson. "A method for determining the long-term aircraft noise level from short-time measurements". 15<sup>th</sup> International Congress on Acoustics Trondheim, Norway. June 1995. ICA95, 177-180, 1995.

- [22] L. C. Fothergill. "The variation of environmental noise outside six dwellings between three seasons". *Applied Acoustics* 10, 191-200, (1977).
- [23] A. Garcia, L.J. Faus. "Statistical analysis of noise levels in urban areas". *Applied Acoustics* 34, 227 – 247 (1991).
- [24] T.J. Schultz. "Some sources of error in community noise measurement". *Sound and Vibration*. 1972. 18-27.
- [25] H. B. Safeer., J. E. Wesler, and E. J. Rickley, "Errors due to sampling in community noise level distributions". *J. Sound vibration* 1972; 24: 365-376 .
- [26] W. A. Utley. "Descriptors for ambient noise". *Internoise* 85: 1069-1072.
- [27] G. Bisio, E. Daminelli, W. Piromalli. "Temporal distributions of outdoor noise levels and CO concentrations in a large size Italian town". *Internoise* 95: 771-774.
- [28] J. B. Malchaire, S. W. Horstman. "Community noise survey of Cincinnati, Ohio". *J. Acoust. Soc. Am.* 1975; 58: 197-200.
- [29] W. K. Connor. "The Behaviour of noise exposure variables in an urban noise survey sample". *Noise Control Engineering*. 1978: 14- 21.
- [30] G. Brambilla, A. Garcia, J.V. Garrigues. "Classification of hourly  $L_{Aeq}$  patterns of urban noise. *Internoise* 97: 903 – 906.
- [31] A. P. O. Carvalho, T. M. D. Ferreira, Rui Calejo Rodrigues, R. Frías. "Expedite methodology for assessing noise levels in an urban scenario based on a new parameter: the significant measurement starts (SMS)." Tenth International Congress on Sound and vibration. Stockholm, Sweden. July 2003: 2743 – 2750..
- [32] E. A. Shaw "Noise environments outdoors and the effects of community noise exposure". *Noise Control Eng. J.* 1996; 44: 109-119.
- [33] Torija A., Ruiz D., Ramos A. "A method for prediction of the stabilization time in traffic noise measurements". 19<sup>th</sup> International Congress on Acoustics. 2007

- [34] A. Reig, E. Gaja, S. Sancho. "Urban traffic noise measurement optimization". Internoise 2000. Niza. France.
- [35] E. Gaja, J.L. Manglano, S. Sancho, A. Reig. "Methodology of noise maps". Proceedings of Eurnoise 98, 1055 – 1058.
- [36] E. Gaja, E. Gonzalez, A. Reig. "Influencia de los anómalos acústicos en el tiempo de estabilización del nivel equivalente horario". Congreso Tecniacustica 2000. Madrid
- [37] A. Piccolo, D. Plutino, G. Cannistraro. "Evaluation and analysis of the environmental noise of Messina, Italy". Applied Acoustics 2005; 66: 447-465.
- [38] K. Kuno, A. Hayashi, Y. Oishi, Y. Mishina. "A consideration of environmental quality standards for noise in Japan". Journal of Sound and Vibration 1988; 127 (3): 565-572.
- [39] H. B. Safeer. "Community noise levels – a statistical phenomenon". Journal of Sound and Vibration 1973; 26 (4): 489 – 502.
- [40] D. Zheng, X. Cai, H. Song, T. Chen. "Study on personal noise exposure in China". Applied Acoustics 1996; 48: 59-70.
- [41] K. Kumar, V.K. Jain. "Autoregressive integrated moving averages (ARIMA) modelling of a traffic noise time series". Applied Acoustics 1999; 58: 283-294.
- [42] M. Machimbarrena Gutierrez, A. Turiño Vacca, J. Gonzalez Suarez, J.I. Sanchez Rivera, M<sup>a</sup> C. Valseros Blanco. "The seasonal nature of urban noise: A case of study". Internoise 97, 839-842. Budapest-Hungary
- [43] J. Foxon. F. J. Pearson. "A statistical model of traffic noise". Applied Acoustics 1968; 1: 175-188.
- [44] U. J. Kurze. "Statistics of road traffic noise". Journal Sound and Vibration 1971;18: 171-195.

- [45] C.G. Don, G. Rees. "Road traffic sound level distributions". Journal Sound and Vibration 1985; 100 (1): 41-53.
- [46] S.K. Tang, W.H. Au "Statistical structures of indoor traffic noise in a high-rise city". Journal Acoustical Society American 1999; 106(6): 3415-3423.
- [47] S. K. Tang. "On the addition of two incoherent unsteady noise records of similar statistical structures". Applied Acoustics 2002; 63: 829-848.
- [48] R. Bartolini, G. Bisio, U. Magrini. "The acoustic mapping of Genoa – The relative weight of the various noise sources and the spatial distribution of outdoor noise levels". Noise Control Engineering Journal 1990; 34 (1): 9-15.
- [49] N. Balakrishnan, V. B. Nevzorov. "A primer on statistical distributions". Chapter 19. Wiley Intersciencie. 2004
- [50] P. J. Brockwell, R. A. Davis. "Time series: Theory and Methods". 2<sup>nd</sup>. Edit., Springer, Berlin, 1991.
- [51] C. Steele. "A critical review of some traffic noise prediction models". Applied Acoustics 62 (2001) 271-287.
- [52] Anon. Handbook of acoustic noise control WADC technical report 52-204. Wright Air development Center, 1952.
- [53] Nickson AF, "Can Community reaction to increased traffic noise be forecast?" In: Proc. Fifth International congress on acoustics, 1965.
- [54] Lamure C. "Niveaux de bruit au voisinage des autoroutes". In: Proc. Fifth International congress on acoustics, 1965.
- [55] Johnson DR, Saunders EG. "The evaluation of noise from freely flowing road traffic". Journal of Sound and Vibration 1968;7(2):287-309.
- [56] Delany ME, Harland DG, Hood RA, Scholes WE. "The prediction of noise levels  $L_{10}$  due to road traffic". Journal of Sound and Vibration 1976;48(3):305-25.

- [57] Koyasu M., "Method of prediction and control of road traffic noise in Japan". Internoise 78. San Francisco 1978.
- [58] Tachibana H., Sasaki M. "ASJ prediction methods of road traffic noise". Internoise 94, Yokohama, 1994.
- [59] Takagi K., Yamamoto K., "Calculation methods for road traffic noise propagation proposed by ASJ" Internoise 94, Yokohama 1994.
- [60] Thanaphan Suksaard et al., "road traffic noise prediction model in Thailand". Applied Acoustics 58 (1999) 123-130.
- [61] Alfredo Calixto, Fabiano B. Diniz, Paulo H.T. Zannin. "The statistical modeling of road traffic noise in an urban setting". Cities, Vol.20 No.1, p. 23-29, 2003.
- [62] K.W. Yeow, N. Popplewell, JFW Mackay. "Method of predicting  $L_{eq}$  created by urban traffic". Journal of Sound and Vibration (1977) 53 (1), 103, 109.
- [63] D. Skarlatos, P. Drakatos. "On selecting the minimum observation time for determining the  $L_{eq}$  of a random noise with a given level of confidence". Journal of Sound and Vibration (1992) 152(1), 141-148.
- [64] E. Manatakis, D. Skarlatos. "A statistical model for evaluation and prediction of the noise exposure in a construction equipment area". Applied Acoustics 63 (2002) 759-773.
- [65] S. Yamaguchi et al., "A fundamental consideration on estimating  $L_{eq}$  of specific noise under the existence of background noise". Applied Acoustics 55(3), 165-180. 1998.
- [66] F.A. Farrelly, G. Brambilla. "Determination of uncertainty in environmental noise measurements by bootstrap method". Journal of Sound and Vibration 268(2003) 167-175.

- [67] Large JB, "Effects of weather conditions on airport noise prediction". *Internoise* 86, Cambridge USA 1986.
- [68] Bernt Øksendal. *Stochastic Differential Equations*. Springer, Sixth edition.
- [69] G.E. Uhlenbeck and L.S. Ornstein. "On the theory of Brownian Motion". *Physical Review* 36:823-41. 1930.
- [70] D.T. Gillespie. "Exact numerical simulation of the Ornstein-Uhlenbek process and its integral". *Physical Review E* 54:2084-91. 1996.
- [71] Dornier, F. and Queruel, M. (2000). "Caution to the Wind". *Risk, Energy and Power Risk Management*, August: 30-32.
- [72] Davis, M. H. A. (2001). "Pricing weather derivatives by marginal value". *Quantitative Finance*, 1(3): 305-308.
- [73] Brody, D. C., Syroka, J. and Zervos, M. (2002). "Dynamical pricing of weather derivatives". *Quantitative Finance*, 2(3): 189-198.
- [74] Alaton, P., Djehiche, B. and Stillberger, D. (2002). "On modelling and pricing weather derivatives". *Applied Mathematical Finance*, 9(1): 1-20.
- [75] Benth, F. E. (2003). "On arbitrage-free pricing of weather derivatives based on fractional Brownian Motion". *Applied Mathematical Finance*, 10(4): 303-324.
- [76] Basawa, I. V. and Prasaka Rao, B. L. S. *Statistical Inference for Stochastic Processes*, pp. 212 – 213, Academic Press, 1980.
- [77] Bibby, B. M. and Sørensen, M. (1995). "Martingale Estimation Functions for Discretely Observed Diffusion Processes", *Bernoulli*, I (1/2): 17-39.